

природу открытой им водородоподобной серии линий, он точно интерпретировал эксперимент уже в первой своей статье, а вторую назвал "Оптический спектр экситона" [7]. Об открытии экситона в полупроводниках и борьбе Гросса за экситонную интерпретацию эксперимента подробно написано в [8]. Здесь же скажу, что основным аргументом Гросса в пользу экситонной идентификации линий была их узость — аргумент, следовавший из теории Френкеля. Это не воспринималось многочисленными оппонентами, так как в начале 50-х годов плохо понимали, что оптические переходы зона — примесь не дают, как правило, узких линий вследствие размазывания волновых функций примеси в пространстве импульсов. Вскоре многочисленными экспериментами была доказана экситонная природа узких линий у края сплошного поглощения в полупроводниках.

В самом начале экситонных исследований, отвечая критикам Гросса на одной из научных сессий Отделения физико-математических наук, Абрам Федорович Иоффе сказал, что, если обнаруженные Гроссом и сотрудниками серии линий даже не принадлежат экситону, эти эксперименты знаменуют собой начало новой области исследований — оптики и спектроскопии полупроводников.

Действительно, экспериментальные и теоретические исследования экситонов в полупроводниках в 50-х и 60-х годах, если пользоваться терминологией Геге и Шиллера, были Sturm und Drang Period (периодом бури и натиска) в спектроскопии полупроводников. Гросс со своими сотрудниками в Ленинграде, теоретики из Киева, американские ученые Хонфилд и Томас за короткое время обнаружили ряд необычных свойств экситонов в электрических и магнитных полях, наблюдали эффекты пространственной дисперсии в экситонных спектрах, предсказали и открыли экситонный поляритон, экситонно-примесные комплексы, установили роль экситонов в формировании спектров люминесценции и фотопроводимости.

Попытки получить конденсат бозе-частиц — экситонов привели к исследованиям процессов в полупроводниках в условиях интенсивного лазерного возбуждения. В связи с этим возникла интереснейшая физическая проблема электронно-дырочной жидкости в кристаллах. В условиях относительно сильного возбуждения непрямозонных полупроводников удалось наблюдать многоэкситонные комплексы, строение которых удивительно напоминает атомы с оболочками, заполняющимися электронами и дырками. Атомоподобность экситонов в полупроводниках привела к мысли о возможности наблюдения в этом классе кристаллов таких явлений, как оптическая ориентация, эффект Ханле, интерференция квантовых состояний, антипересечение уровней, обычно наблюдаемых в изолированных атомах. Все эти явления с успехом наблюдались в полупроводниках, обнаружив новые специфические для кристалла особенности.

Наконец, экситонные состояния сыграли огромную роль в спектроскопии квантоворазмерных структур, полученных современными технологическими методами. В этих структурах энергия связи и сила осциллятора для экситона увеличиваются настолько, что его можно наблюдать в спектре при комнатной температуре.

Яков Ильич Френкель не только теоретически открыл экситон, он дал своему детищу имя, образовав его от греческого *exitos* — возбуждаю. Наверное, он не думал,

что это дитя вырастет в гиганта. Когда работа Френкеля докладывалась на семинаре у Паули, последний оценил ее как falsch, поскольку часто использовал при оценке чужих работ простое резюме: "Das ist entweder falsch oder trivial" (это либо неверно, либо тривиально). Яков Ильич был доволен такой оценкой, было бы обиднее второе [15]. Поистине, "нам не дано предугадать..."

Список литературы

1. Frenkel J. *Phys. Rev.* **137**, 17, 1276 (1931); перевод: Френкель Я.И. *Собрание избранных трудов*. (М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958), т. 2, с. 126—175.
2. Френкель Я.И. *ЖЭТФ* **6** (6), 647—665 (1936).
3. Peierls R. *Ann. d. Phys.* **13**, 59 (1932).
4. Рашба Э.И. *УФН* **144** (2), 347 (1984).
5. Wannier G.H. *Phys. Rev.* **52**, 191 (1937).
6. Mott N. *Trans. Farad. Soc.* **34**, 500 (1938).
7. Гросс Е.Ф. *Избранные труды. Исследования по оптике и спектроскопии кристаллов и жидкостей* (Л.: Наука, 1976), с. 173, 178.
8. Захарченя Б.П. *ФТП* **18** (11), 1940 (1984).
9. Becquerel J. *Phys. Zs.* **8**, 929 (1907).
10. Obreimov I.W., de Haas W.J. *Proc. Amst. Acad.* **32**, 1324 (1929).
11. Hilsch R., Pohl R.W. *Zs. Phys.* **57** (3/4), 145 (1929).
12. Давыдов А.С. *Теория поглощения света в молекулярных кристаллах* (Киев, 1951).
13. Apker L., Taft E. *Phys. Rev.* **79**, 964 (1950); **81**, 698, **82**, 814 (1951).
14. Броуде В.Л., Медведев В.С., Прихотько А.Ф. *ЖЭТФ* **21** (7), 665 (1951).
15. Френкель В.Я. *Яков Ильич Френкель* (М.; Л.: Наука, 1966).

PACS numbers: 01.60 + q.

Р.А. Сурис. Я.И. Френкель о реальной поверхности кристаллов. На протяжении всей своей научной жизни Я.И. Френкель интенсивно занимался молекулярной физикой. Я думаю, что этот круг проблем привлекал его своей сложностью и открывающимися возможностями для почти художественного творчества — постановка и решение задач требовали создания объемных и красочных образов.

Здесь не место давать обзор всего творческого наследия Я.И. Френкеля в этой области. Да я и не думаю, чтобы кто-нибудь взял на себя смелость попытаться решить такую задачу. Моя цель состоит в том, чтобы напомнить об одной работе Я.И. Френкеля, в которой развита модель, играющая важнейшую роль в современной науке о кристаллах и технологии полупроводниковых наноструктур.

Речь пойдет о статье "О поверхностном ползании частиц у кристаллов и естественной шероховатости кристаллических граней", написанной в декабре 1944 г. в Казани во время эвакуации. Английская версия статьи была опубликована в 1945 г. ("*J. of Phys.*" (СССР) **9**, 392) и русский вариант — в 1946 г. (*ЖЭТФ* **16**, 39).

В этой статье Я.И. Френкель нарисовал очень яркую и в буквальном смысле этого слова объемную картину формы поверхностей, ограничивающих реальные кристаллы. Главный момент этой картины состоит в представлении кристаллических граней не как застывших поверхностей, а как непрерывно меняющихся и перестраивающихся под влиянием теплового движения объектов. По Френкелю, кристаллическая грань — это многоярусная ступенчатая поверхность, рельеф которой "дышит" в результате тепловых перемещений по ней адсорбированных атомов.

Я.И. Френкель отталкивается от картины вицинальной поверхности, построенной Эренфестом в 1915 г. [1] и развитой Ямадой [2]. В двумерной ситуации вицинальная грань с индексами $(n, 1)$ (здесь n — достаточно большое целое число), т.е. грань, близкая к грани $(1,0)$, представляет собой отрезки граней $(1,0)$, разделенные ступеньками — изломами, отстоящими друг от друга на n периодов решетки (рис. 1). Ясно, что энергия такой грани превышает энергию грани $(1,0)$ на величину, равную дополнительной энергии, затраченной на образование изломов. Обозначив энергию одного излома как w , легко понять, что энергия грани $(n, 1)$, приходящаяся на единицу ее длины, есть

$$\sigma = \sigma_0 \cos \varphi + \frac{w}{a} |\sin \varphi|.$$

Здесь σ_0 — поверхностная энергия грани (1,0), a — период решетки, а угол наклона грани ($n, 1$) по отношению к (1,0) $\varphi = \arctan(1/n)$. Линейная концентрация изломов N , равная обратному расстоянию между ними — λ , связана с углом очевидным соотношением

$$N = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{an} = \frac{1}{a} \tan \varphi.$$

Ясно, что энергия грани $(n, 1)$ не зависит от направления ее наклона и поэтому в выражение для энергии входит модуль синуса.

Итак, энергия вицинальной грани мало, в меру малости N , отличается от энергии основной грани. Исходя из этого, Я.И. Френкель делает естественный вывод о том, что тепловые флуктуации приводят к возникновению статистических шероховатостей (рис. 2). И здесь он, по сути дела, вводит понятие элементарного возбуждения, ответственного за шероховатость, — излома.

Простые статистические соображения приводят к следующему выражению для средней линейной концентрации изломов на грани (1.0)

$$N = \frac{2}{a} \exp\left(-\frac{w}{T}\right). \quad (1)$$

Множитель 2 возник из-за того, что положительные и отрицательные изломы появляются с равной вероятностью. При $w = 0,4$ эВ и $T = 900$ $Na \approx 1/100$.

Таким образом, грань (1,0) в тепловом равновесии есть прямая только в среднем. Она представляет собой ступенчатую линию с хаотически распределенными изломами, в нашем примере расположенными в среднем на расстоянии в 100 периодов решетки друг от друга. Исходя из приблизительной статистической независимости распределения различных изломов, Я.И. Френкель вычислил среднеквадратичное поперечное смещение этой линии. Результат в высшей степени прозрачен: на участке длиной s средний квадрат смещения

$$\overline{(\delta y)^2} = 2a^2 N_s \quad (2)$$

пропорционален длине s подобно тому, как среднеквадратичное смещение диффундирующей частицы пропорционально времени, $\overline{(\delta y)^2} = 2Dt$, причем роль коэффициента диффузии D играет $a^2 N$. При выбранных выше значениях параметров такое "диффузионное" смещение линии на 1 мм оказывается значительным и составляет примерно 10^{-5} см.

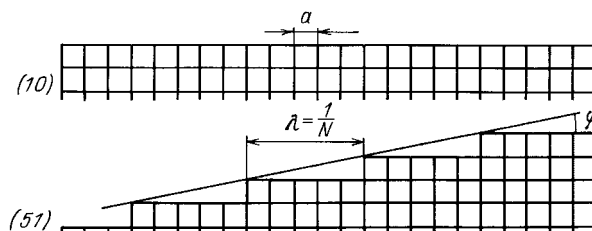


Рис. 1

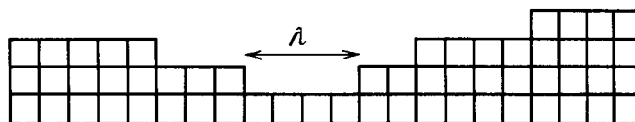


Рис. 2

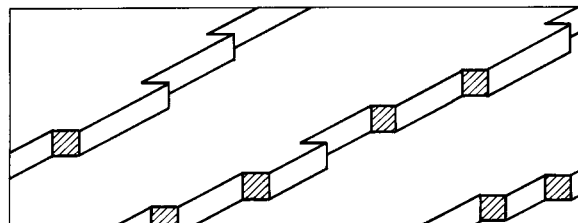


Рис. 3

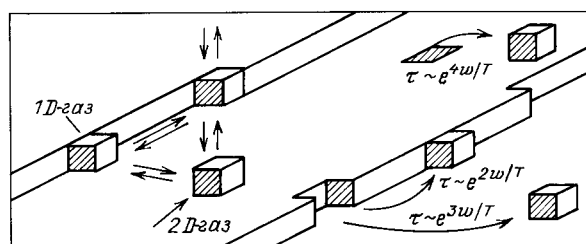


Рис. 4

Что же это такое — двумерная грань с изломами? Я.И. Френкель отмечает, что эта картина описывает ступеньку с изломами на кристаллической грани (рис. 3). Представление о такой структуре поверхности было введено раньше Косселем [3] и Странским [4], но Френкель, по-видимому, первым обратил внимание на необходимость рассматривать тепловые флуктуации как источник возникновения изломов и оценил величину их концентрации, меняющейся благодаря тепловым флуктуациям поверхности кристалла.

Следующий чрезвычайно важный момент обсуждаемой статьи — это рассмотрение вопроса о том, какими же процессами определяется динамика изменений формы поверхности. И здесь Френкель дает чрезвычайно ясное и убедительное обоснование картины, состоящей в том, что временные изменения шероховатостей определяются процессами диффузии атомов, связанных на поверхности кристалла, которые сейчас принято называть адатомами.

Он вводит понятие одномерного и двумерного газов адсорбированных атомов. Одномерный газ образуют те адатомы, которые захвачены "потенциальной канавой" вблизи ступени кристаллической поверхности (рис. 4).

Диффундируя вдоль ступени, они имеют возможность присоединиться к излому или "испариться" в двумерный газ адатомов, движущихся по поверхности террасы. В свою очередь, атомы этого двумерного газа имеют возможность как свалиться в канаву у ступени, так и испариться в трехмерный газ над кристаллом. В простейшей модели Косселя, в которой кристалл образован кубической формы атомами, связанными друг с другом по граням, энергии активации для переходов

излом \rightarrow канавка,

канавка \rightarrow терраса,

терраса \rightarrow трехмерный газ

равны одной энергии связи, w . Энергии же переходов "излом \rightarrow терраса" и "канавка \rightarrow трехмерный газ" равны $2w$. Энергетическая "цена" переходов "излом \rightarrow трехмерный газ" и "ступенька \rightarrow терраса" составляет $3w$. Энергия вырывания атомов из ступени в трехмерный газ и из слоя, образующего террасу, на ее поверхность есть $4w$.

Учитывая, что наименьшую энергию активации имеют первые три выделенные в столбик процесса, а энергия активации диффузии адатомов заведомо меньше энергии отрыва w , Я.И. Френкель делает вывод, что именно эти процессы вместе с поверхностной диффузией и определяют как кинетику флуктуации формы кристалла, так и процессы роста, и "активными центрами" обоих этих процессов служат изломы ступеней. Заметим, что и по представлениям Косселя изломы следует считать центрами роста. Однако он полагал, что идет прямой обмен атомами между изломом и трехмерной фазой. Из приведенных соображений Френкеля ясно, что уж по крайней мере при росте кристалла из газовой фазы это несправедливо.

Приведем здесь выдержку из обсуждаемой статьи Якова Ильича: "Предлагаемое нами обобщение теории Косселя дает не только более правильное представление о процессах, приводящих к изменению *объема* кристалла, но, вместе с тем, объясняет возможность изменений его *формы*, не связанных, хотя бы даже с временными, изменениями объема, т.е. осуществляющихся не через посредство испарения (или растворения) и кристаллизации, но путем поверхностного ползания или поверхностной диффузии атомов кристалла. Подобный поверхностный механизм изменения формы кристаллических тел был недавно предложен П.И. Лукирским для объяснения его опытов по постепенному образованию граней на поверхности кристалла каменной соли, выточенной первоначально в форме шара".

Здесь следует пояснить, что 6.10. 1944 г. П.И. Лукирский направил в печать статью "Опыты с монокристаллами каменной соли" (она вышла в 1945 г. [5]). В ней было показано, что выточенный из кристалла каменной соли шар огранялся в процессе отжига при температурах 720—760 °C в течение нескольких часов, превращаясь в 48-гранную фигуру. Взвешивание и проведение отжига при равновесном давлении паров и без него привели к заключению о том, что испарение не играет существенной роли в этом явлении. И он делает вывод, что основной процесс — это диффузионное переползание атомов, минимизирующее энергию поверхности.

Отметим, что эта работа оказала стимулирующее воздействие и на Л.Д. Ландау. В 1950 г. в сборнике, посвященном 70-летию А.Ф. Иоффе [6], он опубликовал статью "О равновесной форме кристаллов", где, отвлекаясь от вопросов кинетики, на основе термодинамиче-

ского рассмотрения, учитывающего взаимодействие ступеней друг с другом, показал, что равновесная форма кристаллов должна состоять из небольшого числа граней с малыми индексами. В заключение он благодарит Лукирского за то, что последний обратил его внимание на эту проблему.

В 1950 г. Бартон, Кабрера и Франк в своей знаменитой и повсеместно цитируемой работе [7] построили детальнейшую теорию равновесной структуры поверхности и роста кристаллов. Естественно, что в ней неоднократно цитируется обсуждаемая статья Я.И. Френкеля и часто в дискуссионном ключе. Я думаю, что здесь нет необходимости останавливаться на деталях дискуссии. Важно то, что в обсуждаемой статье Я.И. Френкеля построена картина "живой" и непрерывно изменяющейся структуры.

Свое выступление я завершу несколькими замечаниями о современном состоянии проблемы. Появление техники сверхвысокого вакуума, молекулярно-пучковых методов выращивания кристаллов и изощренных методов исследования поверхности с атомным разрешением обусловило колоссальный прогресс в этой области. Теперь удастся контролировать рост кристаллов с точностью до малых долей атомного слоя, наблюдать состояние поверхности непосредственно в процессе роста. Замечательные возможности в этом направлении открывают методы электронной дифракции [8] и сканирующей туннельной микроскопии [9].

Все это было стимулировано развитием полупроводниковой микро- и оптоэлектроники. Квантовые полупроводниковые гетероструктуры, состоящие из встроенных в один кристалл областей нанометровых размеров с различающимися спектрами электронов и дырок, служат основой для создания сверхбыстродействующих электронных схем и полупроводниковых инжекционных лазеров для оптоволоконных линий связи, совершивших революцию в информационной технике. В этих структурах используются особенности волновых функций и энергетического спектра носителей, формирующихся из-за их взаимодействия с гетерограницами, которые разделяют области полупроводников, состоящих из различающихся химических компонент. В структурах, изготовленных методами молекулярно-пучковой эпитаксии, такие гетерограницы играют роль "мгновенных фотографий" поверхности со всеми ее неровностями, относящимися к тому моменту, когда происходила смена атомного состава пучка. Поскольку носители заряда в этих структурах движутся в областях с размерами в несколько атомных слоев, неровности их границ чрезвычайно сильно сказываются на электрических и оптических свойствах. Итак, носители заряда видят "вмороженную" в структуру поверхность кристалла, свойства которой описал Я.И. Френкель.

Естественно, что реальные кристаллы, используемые для выращивания таких структур, — а это главным образом соединения $A^{III}B^V$, $A^{IV}B^{VI}$, $A^{II}B^{VI}$, кремний и германий, — не описываются простой моделью Косселя. Для выращивания чаще всего используют поверхность $(1,0,0)$. И здесь есть важная особенность, обусловленная преимущественно ковалентным характером этих кристаллов и сильной направленностью их химических связей. Два типа ступеней на поверхности $(1,0,0)$ оказываются неэквивалентными. На рис. 5 видно, что все ковалентные связи у края ступеньки $[110]$ направлены

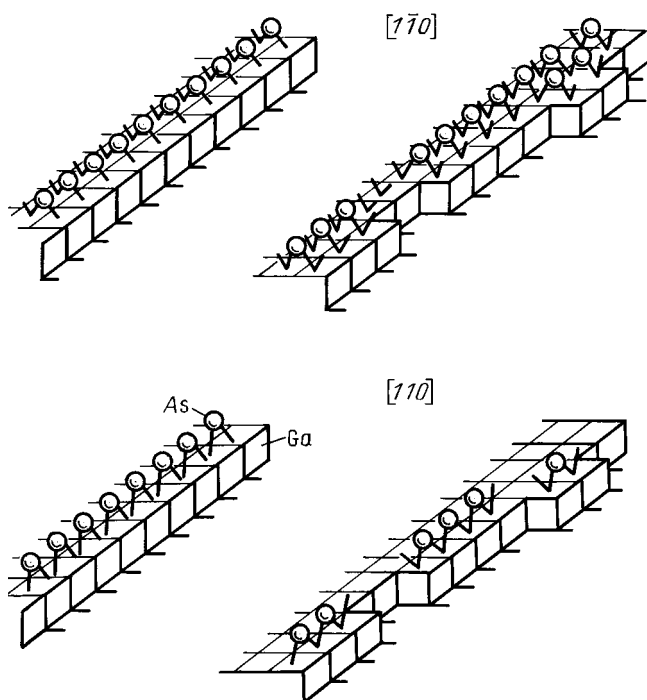


Рис. 5

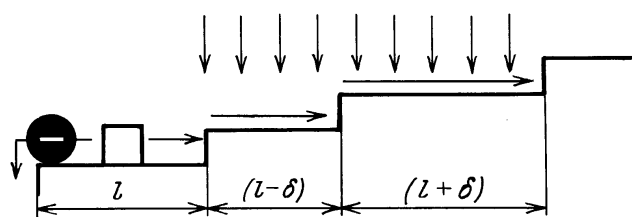


Рис. 6

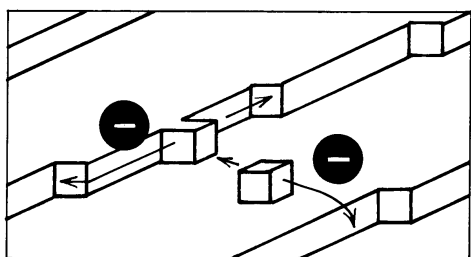


Рис. 7

вдоль нее и, следовательно, образование изломов требует разрыва химических связей. Поэтому и энергия излома есть приблизительно энергия одной связи. Напротив, все связи у края ступеньки $[1\bar{1}0]$ уже оборваны, образование излома не требует дополнительного обрыва связей и его энергия намного меньше, чем для ступени первого типа. Таким образом, зародыш следующего слоя, представляющий собой островок, ограниченный замкнутой ступенькой, для минимизации своей энергии должен приобрести сильно вытянутую вдоль $[110]$ форму [10].

Такая направленность связей имеет своим следствием и сильную анизотропию в предсказанной Я.И. Френкелем шероховатости ступеней, описываемой выражением

(2). Поскольку энергия образования изломов на ступеньке $[1\bar{1}0]$ существенно меньше, чем на ступени $[110]$, средняя концентрация изломов (1) на $[1\bar{1}0]$ намного выше, чем на $[110]$. Следовательно, в соответствии с выражением (2) ступенька $[1\bar{1}0]$ должна быть намного более изрезанной из-за тепловых флуктуаций. Все это подтверждается непосредственными наблюдениями с помощью сканирующей туннельной микроскопии [11].

И, наконец, приведу пример тому, к каким нетривиальным следствиям может приводить предложенная Я.И. Френкелем модель роста кристалла за счет поверхностной диффузии атомов. Рассмотрим вицинальную поверхность, на которую падает атомный пучок (рис. 6). Захваченные поверхностью атомы диффундируют к ступеням, захватываются изломами, приводя к продвижению каждой ступеньки и, следовательно, росту кристалла. Если предположить, что атом захватывается ступенькой при подходе к ней по нижней террасе с большей вероятностью, чем при подходе с верхней (а есть физические основания предполагать, что это так), то система ступеней должна образовывать периодическую структуру, устойчивую относительно отклонений от периодичности [12]. Действительно, если одна из террас меньше соседней, то из-за того, что на нее попадает меньше атомов из газовой фазы, чем на другие террасы, возвышающаяся над ней ступенька (на рис. 6 — правая) будет двигаться со скоростью, меньшей, чем левая, поскольку продвижение последней обеспечено большим диффузионным потоком, собираемым с соседней (см. рис. 6) левой террасы, длина которой больше. Следовательно, длина этой укороченной террасы будет возрастать до тех пор, пока она не сравняется с остальными террасами. Такую "самоорганизацию" поверхности предлагалось использовать для выращивания структур с одномерным электронным газом — квантовых нитей. Однако было показано [13], что ступени будут неустойчивы относительно изгибных флуктуаций. Этой неприятности можно избежать, если иметь поверхность типа $(n, m, 1)$, где n и m — достаточно большие числа [14]. На такой поверхности ступени имеют близкую к периодической систему изломов одного знака, которая, благодаря асимметрии захвата атомов изломами, подобной описанной выше асимметрии захвата ступеньками, обладает устойчивостью относительно нарушения периодичности, обеспечивая тем самым и устойчивость распределения ступеней.

Мне представляется уместным закончить это выступление цитатой из написанного А.Ф. Иоффе биографического очерка, содержащегося во втором томе "Собрания избранных трудов" Я.И. Френкеля (1958 г.): "Отбор наиболее ценного из богатого научного наследия Я.И. Френкеля — дело нелегкое. Некоторые результаты перешли в "золотой фонд" науки; о многих работах не сказано еще последнего слова, хотя они, несомненно, сыграли заметную роль в истории физики. Немало работ, значение которых определилось уже после его смерти и которые, как оказалось, предугадали развитие изучаемого вопроса, но не были оценены, когда появились в печати".

Список литературы

1. Ehrenfest P. *Ann. d. Phys.* **48**, 360 (1915).
2. Yamada M. *Phys. Zs.* **24**, 364 (1923); **25**, 52, 289 (1924).

3. Kossel W. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen* **135** (1927).
4. Stranskii I.N. *Zs. Phys. Chem.* **136**, 259 (1928).
5. Лукирский П.И., ДАН СССР **46**, 300 (1945).
6. Ландау Л.Д. *Собрание трудов* (М.: Наука, 1969), т. 2, с. 119.
7. Burton W., Cabrera N., Frank F. *Phil. Trans. A* **243**, 299 (1951).
8. Joyce D.A., Dobson P.J., Neave J.H., Woodbridge K., *Surf. Sci.* **168**, 423 (1986).
9. Lagally M.G. *Phys Today*. (Nov. 1993), p. 24.
10. Алейнер И.Л., Сурис Р.А. *Письма ЖТФ* **16** (14), 61 (1990); *Superlattices and Microstructures* **10** (3), 375 (1991).
11. Heller E.J., Lagally M.G. *Appl. Phys. Lett.* **60** (21), 25 (1992).
12. Tokura Y., Satio H., Fukui T. *Crystal Growth* **94**, 46 (1989).
13. Bales G., Zangwill A. *Phys. Rev. B* **41**, 5500 (1990).
14. Алейнер И.Л., Сурис Р.А. *ФТТ* **34** (5), 1522 (1992).

PACS numbers: 01.60. + q

В.Я. Френкель. Работы Я.И. Френкеля по ядерной физике. Историю ядерной физики в нашей стране можно условно разделить на несколько этапов. Первый, продолжавшийся более всего и в России мало отмеченный важными событиями, берет свое начало с 1896 г. — года открытия радиоактивности и первых работ, выполненных в этой области в России, и до года чудес — 1932 г., столь богатого выдающимися событиями. В СССР от отмечен прежде всего созданием протон-нейтронной модели атомного ядра (Д.Д. Иваненко), началом работ по строительству циклотрона (Л.В. Мысовский, И.В. Курчатов и их сотрудники) и первыми работами по физике ядра в Ленинградском и Харьковском физико-технических институтах. Второй период как раз и начинается в 1932 г. и продолжается до начала 1936 г. В феврале этого года Н. Бор выдвинул идею о компаунд-ядре, и это дало старт новому рывку в теоретических исследованиях по ядерной физике; таким образом, третий этап занял 1936—1938 гг. Четвертый этап начинается с публикации (январь 1939 г.) знаменитой работы Гана и Штрассмана по делению урана. Заканчивается он у нас, по существу, июнем 1941 г., или, учитывая, что в течение полутора первых лет Великой Отечественной войны работы в области физики ядра практически не велись, последними месяцами 1942 г. Как раз тогда, под руководством И.В. Курчатова, в СССР приступили сначала к организационным, а потом и научно-техническим работам по созданию атомного оружия. Ими и был открыт пятый этап исследований. В августе 1945 г., после атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, они еще более идентифицировались. Конец этого этапа можно отнести к 1946 г. — году успешного запуска первого отечественного ядерного реактора. Шестой этап продолжался от 1946-го до 1949 г. — года, когда была создана и испытана отечественная атомная бомба.

Я.И. Френкель участвовал в исследованиях в рассматриваемой области физики на 1-м, 3-м, 4-м и 6-м этапах. Ниже, по необходимости сжато, рассказывается об этих его работах.

1. В 1916 г., к моменту окончания Яковом Ильичом Френкелем физико-математического факультета Петроградского университета, он уже выполнил и послал в печать работу об электрическом двойном слое на поверхности твердых и жидких тел. В этой работе, доложенной на руководимом А.Ф. Иоффе семинаре по новой физике (при Политехническом институте) Френкелю удалось, основываясь на планетарной модели атома Резер-

форда–Бора, правильно объяснить особенности контактных явлений, являвшихся предметом экспериментальных исследований А. Вольты. Казалось, естественным было бы ожидать, что эту работу (опубликованную одновременно в России и Англии), Яков Ильич представит в качестве своей дипломной. Однако традиция тогдашнего физико-математического факультета (о которой вспоминал А.Ф. Иоффе и, с его слов, И.Е. Тамм [1]) была такова, что оканчивавшим его студентам рекомендовалось писать дипломные работы обзорного характера.

Я.И. Френкель последовал этому неписаному правилу. В трех статьях, опубликованных в 1917 г. [2], он дал детальный обзор состояния атомной (ядерной) физики на рассматриваемое время, прежде всего физики радиоактивности. Два других обзора, опубликованных в том же журнале [3, 4], не идут в сравнение с этой работой Френкеля — ни по полноте, ни по глубине проникновения в материал. Я припоминаю, что, когда готовилось к печати собрание избранных трудов Я.И. Френкеля, Я.Г. Дорфман и А.Г. Самойлович, исходя из указанных выше достоинств работы Френкеля [2], предложили включить ее во 2-й том его трудов (избранные статьи). Редакционная коллегия отклонила это предложение только потому, что объем тома и без того составлял 600 страниц печатного текста.

У Якова Ильича была замечательная профессиональная память, так что систематизированный им тогда материал навсегда ему запомнился. Думается, это помогло ему позднее быстро включиться в соответствующие исследования.

В Петрограде, в первой половине 20-х годов, Френкель сразу оказался единственным кормильцем большой семьи (жена, сын, родители свои и жены, тетушки). Этим определилась, я думаю, довольно интенсивная в те годы научно-популяризаторская его активность, в частности редактирование целого ряда книг. В их числе была и книга известного немецкого инженера Ганса Гюнтера "Технические мечтания" [5]. К ней Яков Ильич написал довольно обширное добавление. Речь в книге Гюнтера шла об источниках энергии — и в этом плане будет уместно привести следующий отрывок из добавления Френкеля к [5] (озаглавленного им так: "Существует ли внутриатомная энергия и можно ли ее использовать?"):

"При сочленении водорода в гелий избыточная энергия атомов водорода должна освобождаться. Ясно, что если бы мы умели вызывать такой синтез, то всякие заботы об энергии отпали бы сами собой. Правда, энергия, о которой мы говорим, составляет около 0,8% той фиктивной энергии (mc^2 — В.Ф.), о которой грезят многие, зато она реальна и об овладении ею мы можем, по крайней мере, мечтать".

Напомним — это был 1925 г. До открытия нейтрона оставалось 7 лет, до первых работ (Хоутерманса и Аткинсона) о ядерной природе энергии звезд — 4 года. Однако уже хорошо известны атомные массы элементов таблицы Менделеева.

Отметим теперь двумя строками попытку Френкеля объяснить природу сильного взаимодействия частиц в ядре, противостоящего его распаду. Я.И. Френкель пытался объяснить это за счет сил магнитного взаимодействия между протонами и (внутриядерными) электронами [6]. Соответствующая работа имеет сейчас лишь исторический интерес, но она была благожелательно