

преобразователей и газовых лазеров, сверхзвуковое движение твердых тел в ионосфере, ионые движители, эрозия поверхности Луны и других планет, ионное легирование полупроводников и радиационная физика. Бурно развиваются работы по исследованию взаимодействия ионных пучков с монокристаллами.

Эмиссионные процессы в настоящее время широко применяются в различных приборах и устройствах для измерения очень малых токов, для получения изображения поверхности, для ионного травления, для получения тонких пленок путем катодного распыления, г. микроэлектронике и во многих других областях.

Непрерывно растет поток публикаций, обнаруживаются все новые и новые области, где бомбардировка твердых тел атомными частицами играет существенную роль. Таким образом, исследования взаимодействия атомных частиц с поверхностью твердого тела приобретают весьма важное значение для физики твердого тела, ядерной физики, электронной техники, космонавтики и энергетики, для многих отраслей промышленности сегодняшнего и завтрашнего дня. За последние годы школой физической электроники АН УзССР достигнуты значительные успехи в разработке некоторых из названных выше научных направлений.

Еще в 40-х годах при исследовании вторичной эмиссии было обнаружено, что пленки щелочно-галоидных солей являются эффективными эмиттерами вторичных электронов. Эти ранние работы стимулировали в дальнейшем проведение широких исследований одновременно происходящих многообразных явлений на границе твердое тело — вакуум. Было замечено, что ранние работы выполнялись в недостаточно контролируемых условиях, и поэтому характер явлений, происходящих при бомбардировке металлов атомными частицами, в то время не был четко уяснен.

Чтобы сохранить чистой исследуемую поверхность до и в момент измерения, необходимо использовать высокие температуры поверхности и безынерционные скоростные методы измерения при условии воздействия на поверхность кратковременными импульсами бомбардирующих частиц. Этим требованиям удовлетворяет разработанный в Институте электронике Академии наук УзССР метод двойной модуляции.

С помощью метода двойной модуляции была установлена независимость процесса рассеяния от температуры мишени, показано, что группа ионов с малыми энергиями, появляющаяся при высоких температурах мишней, действительно состоит из испарившихся ионов и имеет характерное для испарения адсорбированной пленки время жизни, зависящее от температуры. Кроме того, обнаружена еще одна группа вторичных ионов, появляющаяся только при высоких температурах в результате испарения с поверхности глубоко проникших в мишень первичных ионов и обладающая значительно большей инерционностью. Использование метода двойной модуляции позволило впервые зарегистрировать в целом картину явлений, происходящих при бомбардировке металлов ионами, и начать углубленное изучение элементарных явлений рассеяния первичных ионов, испарения и диффузии внедренных ионов, катодного распыления и вторичной электронной эмиссии.

Работы, выполненные в АН УзССР на протяжении почти четверти века, в значительной мере помогли осветить различные моменты и особенности, характеризующие взаимодействие быстрых атомов, ионов и электронов с поверхностью твердых тел.

К настоящему времени выяснены основные закономерности рассеяния твердым телом ионов, электронов и атомов средних и малых энергий, определены характеристики ионной и электронной эмиссии, установлены особенности катодного распыления в условиях бомбардировки мишней атомными частицами. Изучены зависимости этих явлений от условий на бомбардируемой поверхности и от многих других параметров взаимодействия. Экспериментально и теоретически исследованы закономерности баланса массы и заряда сталкивающихся частиц. Ведутся исследования баланса энергии при воздействии атомных частиц на твердые тела. Идет глубокое изучение вышеуказанных явлений и возможностей их практического применения.

В дальнейшем представляется целесообразным развивать научные исследования в следующих направлениях:

- 1) взаимодействие атомных частиц низких и сверхнизких энергий (десятки, единицы и доли электрон-вольт) с твердыми телами;
- 2) бомбардировка твердых тел атомными частицами с энергией в сотни тысяч и миллионы электрон-вольт;
- 3) воздействие многозарядных ионов на вещество;
- 4) взаимодействия лазерного излучения и медленных позитронов с поверхностью твердых тел;
- 5) построение последовательной и строгой теоретической интерпретации изучаемых и используемых эмиссионных электронных и атомных процессов и явлений, а также процессов на поверхности и в приповерхностном слое.

**Э. И. Адирович. Фотоэлектрический и фотомагнитный эффекты в полупроводниковых пленках.**

1. Из общих выражений для фотонапрежения в однородном полупроводнике (фотодиффузионный, или дембер-эффект) и в полупроводнике с переходом по типу

проводимости (фотовольтаический эффект на  $p - n$ -переходе) следует, что  $V_\Phi$  не может превышать ширины запрещенной зоны  $E_g$ . Аномальные фотонапряжения (АФН) были обнаружены в тонких слоях PbS ( $E_g = 0,4$  эв,  $V_\Phi \approx 1 - 2$  эв<sup>1</sup>), однако это явление (АФН-эффект) вызвало большой интерес только после того, как на пленках CdTe были получены  $V_\Phi \sim 100$  эв в работе<sup>2</sup>. Было показано, что АФН-эффект не специфичен для какого-то узкого класса полупроводников, а может быть получен на пленках из любых полупроводниковых материалов (Ge, Si, GaAs, SiC, GaP, InP, ZnTe, GaTe<sub>3</sub>, Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, и др.)<sup>3</sup>. Максимальные значения  $V_{\text{АФН}} \approx 6000$  эв удалось получить на халькогенидных пленках<sup>4</sup>.

Экспериментально изучены люкс-вольтовые  $V(B)$ , температурные  $V(T)$ , спектральные  $V(\lambda)$ , поляризационные  $V$  (фото), кинетические  $V(t)$  и др. характеристики АФН-эффекта. Результаты этих исследований содержат большой объем информации о свойствах АФН-пленок, но не могут дать однозначный ответ о природе АФН-эффекта. Для этого должны быть решены две дилеммы: 1) предстает ли собой АФН-пленка единый фотоэлемент или же батарея из большого числа микрофотоэлементов; 2) каков механизм элементарных процессов, приводящих к возникновению АФН-эффекта (фотодиффузионный или фотовольтаический).

Фотоэлементная теория<sup>4</sup> опирается на предположение о неравномерном распределении уровней прилипания в АФН-пленке, приводящем к появлению пространственных зарядов локализованных фотоносителей. В работе<sup>5</sup> показана несостоятельность такой модели и дано общее теоретическое доказательство необходимости формирования  $V_{\text{АФН}}$  как суммы малых фотонапряжений, генерируемых в отдельных микрофотоэлементах. В работах<sup>6</sup> предложен экспериментальный метод, служащий *experientum sciis* для выяснения природы электронных процессов в отдельных микрофотоэлементах. Идея его связана с тем, что в случае нормального дембера-эффекта должна происходить инверсия знака  $V_\Phi$  при изменении угла падения света, а при фотоэффекте на  $p - n$ -переходе и при аномальном дембера-эффекте знак  $V_\Phi$  должен оставаться постоянным. Дискриминация фотовольтаического и аномального дембера-эффектов осуществляется при коротковолновом возбуждении, когда аномальный дембера-эффект переходит в нормальный. Сочетание исследований угловых и спектральных закономерностей позволило установить, что в пленках Ge, Si, GaAs АФН-эффект обусловлен фотодиффузионным, а в пленках CdTe, GaP и халькогенидных соединений — фотовольтаическим механизмом.

2. Для возникновения  $V_{\text{АФН}}$  в многослойной  $p - n - p - n - \dots$ -структуре необходимо, чтобы  $p - n$ - и  $n - p$ -переходы были освещены неодинаково. Рис. 1, а поясняет, как это осуществляется в АФН-пленках. Эта модель эквивалентна одномерной многослойной структуре и растру, оставляющему открытыми  $p - n$ -переходы и затеняющему  $n - p$ -переходы (рис. 1, б). В отличие от фотоэлектрических, фотомагнитные напряжения на  $p - n$ - и  $n - p$ -переходах не вычитаются, а складываются<sup>7,8</sup>. Следовательно, в АФН-пленках, где аномально велик разностный фотоэлектрический эффект, тем более должен усиливаться аддитивный фотомагнитный эффект на  $p - n$ -переходах.

Эти соображения привели к открытию в полупроводниковых пленках аномально большого фотомагнитного эффекта (АФМЭ), достигающего десятков и сотен вольт<sup>9</sup>. Измерения  $V_{\text{АФМЭ}}$  и  $I_{\text{АФМЭ}}$  на пленках CdTe до  $B \sim 300\,000$  мк и  $H = 80$  кэ показали согласие эксперимента с теорией. Кривые  $V_{\text{АФМЭ}}(B)$  имеют вид, показанный на рис. 2 (кривые 1—6, 8—10 —  $V_{\text{АФМЭ}}(B)$  при  $H$  от 20 э до 3,5 кэ; кривая 7 —  $V_{\text{АФН}}(B)$ ). Зависимость  $V_{\text{АФМЭ}}(H)$  линейна до  $H \approx 50 - 60$  кэ, пока  $\mu \frac{H}{c} \ll 1$ . Совместное изучение

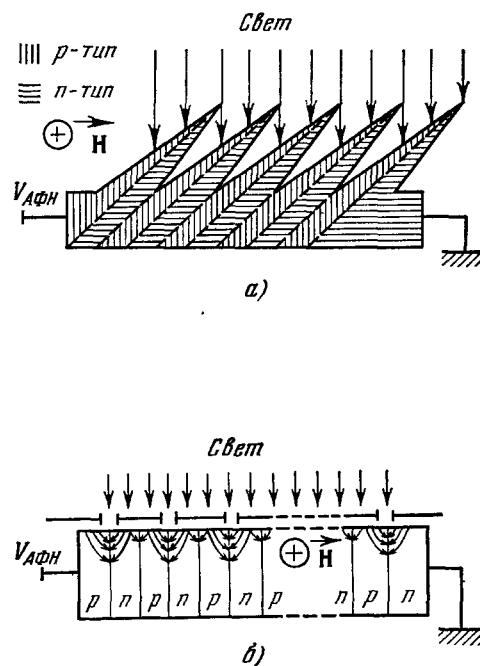


Рис. 1.

фотомагнитного и фотохолловского эффектов дает возможность прямого измерения подвижности fotoносителей ( $\mu \sim 100 \text{ см}^2/\text{в}\cdot\text{сек}$ ) и числа микро- $p$  —  $n$ -переходов в АФН-пленке ( $N \sim 10^4$ — $10^5$ ). Проведены также спектральные, температурные и кинетические исследования и установлено, что подвижность fotoносителей  $\mu \propto T^{-2,1}$ , время жизни в зоне  $\tau \sim 10^{-10} \text{ сек}$ , а время жизни на уровнях прилипания  $\tau_{\text{п}} \sim 10^{-6} \text{ сек}$ .

Чувствительность фотомагнитного эффекта в АФН-пленках  $\approx 5 \text{ мв/з}$ , что более чем на порядок выше чувствительности эффекта Холла.

3. АФН-эффект и АФМ-эффект в пленках представляют интерес не только для физики полупроводников, но и для оптоэлектроники, для которой весьма актуальна

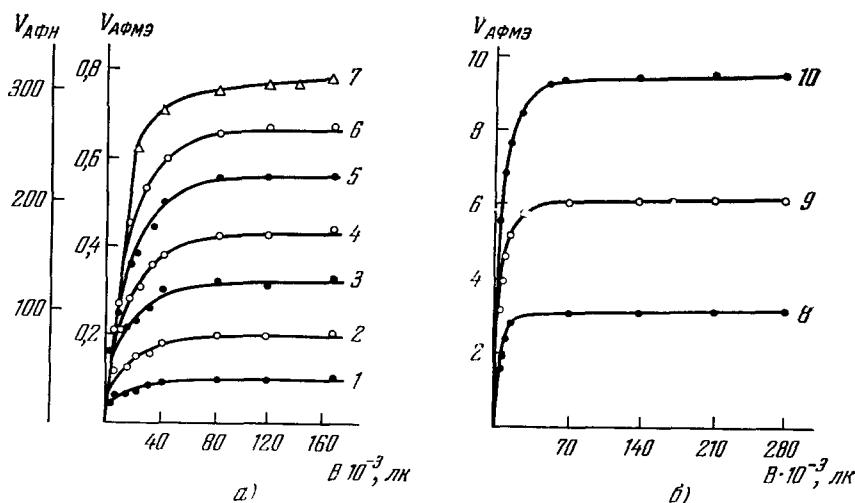


Рис. 2.

задача нахождения новых физических принципов преобразования световых и оптических сигналов<sup>10</sup>. Оптрон с АФН-пленкой в качестве приемника света основан на фотогенерационном, а не на фотоключевом принципе и поэтому не требует электрического питания. Описанное в работе<sup>10</sup> матричное устройство на АФН-пленках осуществляет преобразование изображения в электрический потенциальный рельеф. Применение АФН-пленок позволяет использовать световые сигналы в оптоэлектронных устройствах не только как информационные, но и как сигналы управления. АФМ-эффект позволяет создать миниатюрный и автономный (не требующий электрического питания) датчик магнитного поля, значительно превышающий по чувствительности датчики Холла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. Starkiewicz, L. Sosnowski, O. Simpson, Nature **158**, 26 (1946).
2. L. Pensak, B. Goldstein, J. Appl. Phys. **30**, 155 (1959).
3. Э. И. Адирович и др., ФТТ **6**, 3180 (1964); **7**, 3652 (1965); ДАН СССР **155**, 1286 (1964); **181**, 1090 (1968); ФТП **2**, 1020 (1968).
4. H. W. Brandom, A. E. Potter, J. Appl. Phys. **35**, 1997 (1964).
5. Э. И. Адирович, В. М. Рубинов, Ю. М. Юабов, ДАН СССР **164**, 529 (1965).
6. Э. И. Адирович, В. М. Рубинов, Ю. М. Юабов, ДАН СССР **168**, 1037 (1966); **174**, 545 (1967).
7. И. К. Кикоин, И. Н. Николаев, ЖЭТФ **41**, 1692 (1961).
8. Ю. И. Равич, Фотомагнитный эффект в полупроводниках и его применение, М., «Сов. радио», 1967.
9. Э. И. Адирович, Э. М. Мастов, Ю. М. Юабов, ДАН СССР **188**, 1254 (1969); Proc. of the Intern. Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Heterojunctions and Layer Structures (Budapest, October 11—17, 1970), Akademia Kiadó, Budapest, 1971; ФТП **5**, 1415 (1971).
10. Э. И. Адирович, в сборнике «Микроэлектроника», вып. 1, М., «Сов. радио», 1967, стр. 75; Изв. вузов (Радиоэлектроника) **11**, 679 (1968).