

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук**

(19 декабря 2005 г.)

19 декабря 2005 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Крохин О.Н.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Передача электрической энергии посредством лазерного излучения.*

2. **Забродский А.Г.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *Физика, микро- и нанотехнологии портативных топливных элементов.*

3. **Аворин Е.Н., Симоненко В.А., Шибаршов Л.И.** (Российский федеральный ядерный центр "Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е.Н. Забабахина", г. Снежинск, Челябинская область). *Физические исследования при ядерных взрывах.*

4. **Преображенский В.Л.** (Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Объединенная европейская лаборатория нелинейной магнитоакустики конденсированных сред (LEMAC)). *Нелинейная акустика ультразвуковых волн с обращенным фронтом.*

Краткое содержание первых трех докладов публикуется ниже. Доклад В.Л. Преображенского близок по содержанию к его сообщению на сессии ОФН РАН 28 сентября 2005 г., краткое содержание которого опубликовано в № 1 УФН за этот год в разделе "Конференции и симпозиумы".

PACS numbers: 42.60.-v, 42.79.Gn, 42.40.+w

**Передача электрической энергии
посредством лазерного излучения**

О.Н. Крохин

В докладе рассматривается возможность построения линии передачи электрической энергии посредством ее преобразования в лазерное излучение, которое впоследствии снова преобразуется в электрический ток на полупроводниковой структуре, аналогичной структуре полупроводникового лазера. Передача энергии осуществляется по оптическому волокну.

Особенностью рассматриваемой схемы являетсяmonoхроматичность преобразуемого в электрический

ток излучения и, что принципиально важно, пространственная когерентность этого излучения. Потери электрической энергии в такой линии передачи могут составить заметную величину, но уже сейчас при использовании полупроводниковых структур в качестве элементов-преобразователей можно говорить о величине не более 50 % для небольших расстояний.

В работе Н.Г. Басова и автора этого доклада было обращено внимание на возможность возникновения электродвижущей силы (ЭДС) внутри полупроводника (подобного арсениду галлия, применяемого для создания диодных лазеров), который имеет структуру зон, допускающих прямой оптический переход при облучении его монохроматическим излучением большой мощности [1]. Энергия квантов этого излучения должна быть близка к краю поглощения ($\hbar\omega \geq \Delta$, где Δ — ширина запрещенной зоны), когда коэффициент поглощения невелик, в противном случае полупроводник будет разрушен тепловым ударом при больших подаваемых потоках излучения. Электродвижущая сила возникает вследствие того, что при поглощении светового потока концентрация электронов и дырок возрастают, возникает сильнонеравновесное состояние, которое может быть описано посредством введения понятия квазиуровней Ферми для электронов μ_e в зоне проводимости и μ_v в валентной зоне, и величина ЭДС определяется выражением $(\mu_e - \mu_v)/e$ (e — заряд электрона).

В пределе очень больших плотностей потока падающего излучения разность квазиуровней Ферми будет стремиться к значению энергии кванта $\hbar\omega$. Это состояние называется эффектом насыщения поглощения и является хорошо известным в квантовой электронике.

Помимо монохроматичности падающее излучение должно иметь хорошую пространственную когерентность, в противном случае его невозможно сконцентрировать на малом входном окне полупроводниковой структуры, иначе говоря, это излучение должно иметь лазерное происхождение. Подача такого излучения осуществляется посредством сопряженного с лазерным источником и структурой, преобразующей энергию света в электричество, оптического волновода — оптоволокна. Лазер, преобразующая структура и оптоволокно образуют единую оптическую систему — составной резонатор.

Эффект насыщения возникает, как известно, в том случае, когда вероятность оптических переходов (вероятность поглощения и вероятность индуцирован-

ногого излучения) значительно превышает вероятность релаксации в рассматриваемой квантовой системе (две группы нижних и верхних квантовых уровней). При этом плотность поглощаемой мощности асимптотически стремится к величине энергии, уводимой в релаксационный канал из единицы объема в единицу времени. Для полупроводника, находящегося в мощном монохроматическом поле, эффект насыщения, как сказано выше, сводится к асимптотическому приближению разности квазиуровней Ферми электронов в зоне проводимости и валентной зоне к значению энергии кванта. При этом коэффициент поглощения, естественно, стремится к нулю. Конечно, все это относится к переходам вблизи края поглощения, т.е. при $\hbar\omega \geq \Delta$, поскольку при $\hbar\omega < \Delta$, заметно превышающей Δ , подойти к насыщению невозможно из-за резкого роста плотности электронных состояний и, следовательно, резкого возрастания плотности мощности, уходящей через релаксационный канал. В этом, в частности, заключается отличие рассматриваемой схемы преобразования энергии от фотоэлектрических преобразователей (солнечных батарей), в которых преобразуемые плотности мощности световой энергии малы. По существу, то, что рассматривается в данном докладе, представляет собой схему близкую к полупроводниковому лазеру, работающему в обратном направлении: "свет — в электрический ток".

Другой существенной особенностью рассматриваемой схемы является использование в качестве линии передачи энергии оптоволокна, которое в идеальном случае сохраняет качество пространственной когерентности передаваемой электромагнитной волны. Другими словами, если на одном конце оптоволоконной линии полупроводниковым лазером генерируется излучение, то на другом конце оно имеет такую же яркость и может быть введено в аналогичную по своим геометрическим размерам полупроводниковую структуру, преобразующую световую энергию в электрическую, — "преобразователь" (рис. 1). Таким образом, вся система представляет собой длинный резонатор, в котором реализуются определенные световые моды. При этом для увеличения эффективной длины поглощения излучения в преобразователе задняя поверхность полупроводниковой структуры может быть сделана полностью отражающей. Можно также применить для этой цели ряд последовательно расположенных электрически связанных секций, которые могут обеспечить полное поглощение приходящего в структуру излучения, или использовать многопроходную схему.

Рассмотрим принцип работы преобразователя монохроматического излучения в электрический ток. На рисунке 2 представлена схема устройства. Излучение из световода подводится к узкой области образца, имеющей собственную проводимость (i-тип) и расположенной

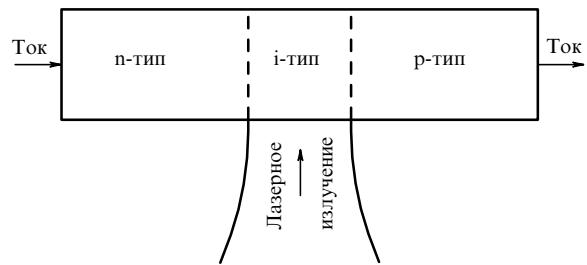


Рис. 2. Принципиальная схема устройства преобразователя света в ток.

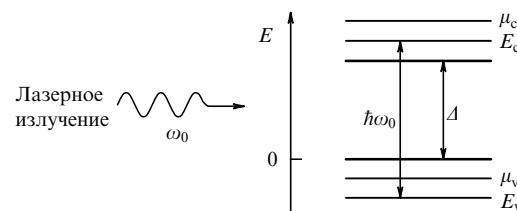


Рис. 3. Схема электронных уровней полупроводника. Показаны оптические прямые переходы электронов между зоной проводимости и валентной зоной и положения квазиуровней Ферми в этих зонах.

между слоями с электронной и дырочной проводимостью. Предполагается, что оптический переход является прямым, т.е. происходит практически без изменения импульса электрона в валентной зоне и зоне проводимости. На рисунке 3 представлена энергетическая схема квантовых уровней и оптический переход в преобразователе. Подразумевается, что в преобразователе должны использоваться полупроводниковые материалы и при его изготовлении могут быть использованы технологические приемы, аналогичные применяемым при изготовлении полупроводниковых лазеров.

При облучении полупроводника монохроматическим полем возникают оптические переходы из валентной зоны в зону проводимости с поглощением кванта и в обратном направлении с его индуцированным излучением. Если интенсивность падающего излучения мала, то релаксация (радиационные спонтанные и безызлучательные переходы) поддерживает тепловое равновесие и поглощение превалирует над индуцированным излучением, следовательно, валентная зона будет почти целиком заполнена (если легирование донорными и акцепторными примесями не очень сильное). При увеличении интенсивности излучения будет возрастать населенность уровней зоны проводимости (равная функции распределения $f_c(E_c)$, где E_c — энергия уровня в зоне проводимости) и будет уменьшаться населенность уровней в валентной зоне, описываемая $f_v(E_v)$, где E_v — энергия уровня в валентной зоне. Таким образом, для коэффициента поглощения $k(\omega_0)$ можно написать:

$$k(\omega_0) = \alpha(\omega_0) [f_v(E_v) - f_c(E_c)], \quad (1)$$

где ω_0 — частота падающего излучения, $E_c - E_v = \hbar\omega_0 \geq \Delta$, $\alpha(\omega_0)$ — коэффициент поглощения при малых интенсивностях и низкой температуре, когда равновесная концентрация носителей невелика и не зависит от интенсивности излучения, т.е. $f_c \sim 0$, $f_v \sim 1$.



Рис. 1. Схема линии передачи энергии.

Для прямых переходов

$$\alpha \sim (\hbar\omega_0 - \Delta)^{1/2}. \quad (2)$$

Для достаточно сильно легированных полупроводников

$$\alpha \sim \exp [\gamma(\hbar\omega_0 - \Delta)], \quad (3)$$

где γ — параметр, т.е. $\alpha(\omega_0)$ вблизи края поглощения, $\hbar\omega_0 \geq \Delta$, пропорционален плотности электронных состояний.

С увеличением интенсивности квазиуровни Ферми электронов зон начинают смещаться в соответствующие зоны, что проявляется в возникновении неравновесных электронов в зоне проводимости и вакантных мест (дырок) в валентной зоне, и при очень больших интенсивностях, когда скорость релаксационных процессов относительно мала, разность квазиуровней Ферми в зоне проводимости μ_c и валентной зоне μ_v асимптотически стремится к $\hbar\omega_0$:

$$\mu_c - \mu_v \rightarrow \hbar\omega_0.$$

Подставив в (1) выражение для функции распределения Ферми

$$f(E) = \frac{1}{\exp [(E - \mu)/T] + 1}, \quad (4)$$

выражение (1) можно переписать в виде (рис. 4)

$$k(\omega_0) = \alpha(\omega_0) \frac{1}{\exp [(E_v - \mu_v)/T]} \times \\ \times \left\{ 1 - \frac{1}{\exp [(\hbar\omega_0 - \mu_c + \mu_v)/T]} \right\}, \quad (5)$$

откуда видно, что $k(\omega_0) \rightarrow 0$ при $\mu_c - \mu_v \rightarrow \hbar\omega_0$.

Число квантов приходящего излучения, поглощенное в единице объема в единицу времени, равно

$$-\frac{dI}{dx} = k(\omega_0) I,$$

где I — поток квантов, отнесенный к единице поверхности (интенсивность). Из соотношения (5) видно, что эффект насыщения поглощения становится заметным, когда $\hbar\omega_0 - \mu_c + \mu_v \leq T$. Это обстоятельство позволяет разложить выражение в правой части (5) по малой величине $(\hbar\omega_0 - \mu_c + \mu_v)/T$ и получить очень приближенно:

$$k(\omega_0) = \alpha(\omega_0) \frac{\hbar\omega_0 - \mu_c + \mu_v}{T} \frac{1}{\exp [(E_v - \mu_v)/T]}, \quad (6)$$

где последний множитель в правой части возникает из-за неравенства эффективных масс электронов в зоне проводимости и валентной зоне (эффективные массы электронов и дырок).

Величина $f_v(E_v) - f_c(E_c)$ может быть определена в стационарном случае из условия равенства скорости поглощения $|k|I$ и скорости рекомбинации электронов и дырок, т.е. релаксации, отнесенных к единице объема $R(n, p)$, которая при больших уровнях неравновесных концентраций электронов n и дырок p пропорциональна их произведению,

$$|k|I = R. \quad (7)$$

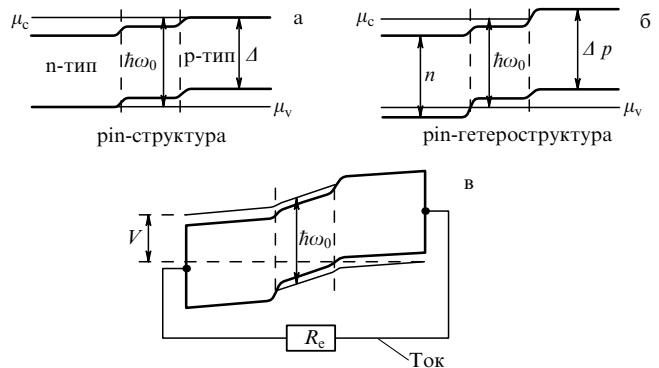


Рис. 4. Энергетическая структура полупроводникового преобразователя: (а, б) "холостой" режим, (в) режим под нагрузкой R_e , V — электрическое напряжение, pin-структура — последовательное расположение р-области, нелегированной i-области и п-области.

Если для коэффициента поглощения использовать упрощенное выражение (6), то (7) можно переписать в виде

$$\hbar\omega_0 - \mu_c + \mu_v \approx \frac{TR}{\alpha(\omega_0)I} \exp \left(\frac{E_v - \mu_v}{T} \right), \quad (8)$$

откуда следует, что разность $\mu_c - \mu_v$ стремится к $\hbar\omega_0$ при больших интенсивностях.

Таким образом, в области поглощения возникает электродвижущая сила. Для того, чтобы реализовать ее в виде электрического тока, необходимо, чтобы электроны и дырки двигались в разные стороны, что можно осуществить, присоединив к поглощенному объему по разные стороны полупроводники с п- и р-типов проводимости, имеющие высокий уровень легирования. Тогда электроны при подключении нагрузки под действием поля в активной области будут дрейфовать в п-область, а дырки — в р-область (см. рис. 4).

Для того чтобы уменьшить потери за счет ухода электронов в п-область, а дырок в р-область, можно применить гетероструктуру, которая создает дополнительные барьеры соответственно для электронов и дырок. В этом случае возникающий электрический ток "нагружает" объем, в котором происходит генерация электронно-дырочных пар и формула (7) может быть переписана в виде

$$kI = R + \frac{J}{de}, \quad (9)$$

где J — плотность электрического тока, d — толщина слоя, в котором происходит генерация электронно-дырочных пар.

Параметры такой линии передачи электрической энергии можно оценить, используя аналогию с разработанными в последнее время устройствами и элементами — полупроводниковыми лазерами и оптическими волокнами. Полупроводниковые лазеры дают возможность в единичном приборе получить мощность более 10 Вт при весьма высоком КПД, порядка 70 % [2]. Излучающее окно такого лазера имеет размеры 1 × 100 мкм, т.е. плотность мощности достигает 10 МВт см⁻². Это очень большая величина. В солнечных батареях преобразуется плотность мощности света менее 1 Вт см⁻². Поскольку преобразователь световой энергии в электрический ток по своему устройству и технологическому исполнению близок к полупро-

водниковому лазеру и, по существу, представляет собой лазер, работающий в обратном направлении, то можно в дальнейшем рассчитывать на такие же высокие коэффициенты преобразования. Современные оптические волокна способны пропускать значительные световые потоки, более 100 Вт, и имеют очень небольшие коэффициенты затухания, порядка $0,1 \text{ Дб м}^{-1}$ [3].

Таким образом, предложенная схема дает возможность передавать электрическую энергию на небольшие расстояния с коэффициентом передачи 50 %. Надо заметить, что здесь речь идет о низковольтной линии передачи с напряжением порядка ширины запрещенной зоны полупроводника. Отличие рассматриваемого варианта преобразователя от широко применяемого фотоэлектрического элемента, имеющего весьма высокий КПД, заключается в использовании пространственной когерентности генерируемого лазером излучения, что дает возможность реализовать на входе в преобразователь высокую концентрацию мощности и, таким образом, размеры преобразователя оказываются малыми по сравнению с размерами обычных фотоэлектрических элементов.

По-видимому, можно попытаться сделать преобразователь в виде слоистой структуры, в которой излучение проходит последовательно через несколько слоев, постепенно поглощаясь, а электрическую связь между слоями следует осуществлять по последовательной схеме. Тогда такой преобразователь на выходе даст более высокое напряжение.

В заключение следует отметить, что рассмотренный здесь способ передачи электрической энергии может оказаться полезным в низковольтных линиях или в других случаях, когда существуют нежелательные посторонние электрические помехи в передающих линиях или устройствах коммутации цепей. Кроме того, их можно использовать, когда невозможно применение металлических проводников (например в высоковольтных устройствах), а также когда важно уменьшить весовые характеристики линий питания.

Список литературы

1. Басов Н Г, Крохин О Н *ФТТ* **5** 2384 (1963)
2. Bugge F et al. *Appl. Phys. Lett.* **79** 1965 (2001); Pikhtin N A et al. *Electron. Lett.* **40** 1413 (2004)
3. Broderick N G R et al. *Opt. Fiber Technol.* **5** 185 (1999)

PACS numbers: 82.40.-h, 82.45.Yz, 82.47.-a

Физика, микро- и нанотехнологии портативных топливных элементов

А.Г. Забродский

1. Введение

В докладе представлен краткий обзор результатов исследований, ведущихся на базе Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе (ФТИ) и ряда других институтов РАН в области одного из направлений водородной энергетики, связанного с разработкой портативных топливных элементов (ТЭ).

Собственно, для ленинградского Физтеха проведение работ в области энергетики является традиционным.

Именно здесь А.Ф. Иоффе была создана отечественная школа в области термоэлектричества, начато его практическое использование для целей охлаждения. Здесь в 1930-е годы в лаборатории И.В. Курчатова при поддержке Иоффе разворачиваются ядерные исследования, в ходе которых молодые Г.Н. Флеров и К.А. Петржак открывают спонтанное деление ядер урана. С началом войны Г.Н. Флеров оказывается в школе авиационных техников и оттуда пишет свое известное письмо И.В. Сталину о необходимости безотлагательного начала работ над атомной бомбой, с которого началась история советского атомного проекта и ядерной энергетики, в которую много славных страниц было вписано физтеховцами. Именно в ФТИ под руководством В.Н. Тучковича зародилось новое направление — силовая полупроводниковая электроника. Из развитого в ФТИ магистрального направления в физике, технологии и технике, связанного с именем Ж.И. Алферова и деятельностью созданной им научной школы в области полупроводниковых гетероструктур, можно выделить высокоэффективную солнечную энергетику на полупроводниковых гетероструктурах. Около полувека ФТИ активно участвует в программах физических исследований, создания и развития техники управляемого термоядерного синтеза на основе токамаков и в работах по диагностике горячей плазмы, а несколько лет назад были начаты физические исследования на созданной в Физтехе принципиально новой установке — сферическом токамаке "Глобус-М".

Сравнительно недавно ФТИ активно включился в работы по водородной энергетике в рамках программы совместных исследований РАН и ОАО ГМК "Норильский никель" (впоследствии — Национальная инновационная компания "Новые энергетические проекты"). Здесь мы будем говорить только о работах, связанных с разработкой новых типов портативных ТЭ. Представленный ниже материал иллюстрирует традиционный для ФТИ путь: от научных исследований — к базовым технологиям и далее, к разработке новой техники. В качестве "базовых технологий" в данном случае выступают технологии нанесения монодисперсных нанокатализаторов (раздел 3), а также кремниевые микро- и нанотехнологии (раздел 4), используемые для разработки портативных ТЭ (раздел 5). Обсуждается также возможный путь увеличения эффективности и удельной мощности ТЭ (раздел 5). Минимально необходимые сведения по водородной энергетике и ТЭ приведены в разделе 2.

2. Водородная энергетика и топливные элементы

Интерес к водородной энергетике стимулируется постепенным истощением запасов ископаемых видов топлива¹ и экологическими проблемами, а также

¹ Заметим, что наши представления об истощении запасов нефти формируются в основном из динамики роста цен на нефть и бензин. Эти цены сильно зависят от инфляции мировой валюты и политической стабильности в основных регионах нефтедобычи. Резкий взлет цен сопровождает революционные события и войны в этих регионах. Абсолютный же рекорд цены нефти с учетом инфляции приходится вовсе не на настоящее время, а на период революции в Иране на рубеже 1970–1980-х годов. Тем не менее факт значительного истощения природных запасов топлива, в первую очередь нефти, действительно имеет место и беспокоит правительства стран-импортеров.