

Памяти Жореса Ивановича Алфёрова



1 марта 2019 г. на 89 году жизни скончался выдающийся российский ученый в области физики твердого тела — академик, лауреат Нобелевской премии Жорес Иванович Алфёров.

Ж.И. Алфёров родился в Белоруссии, в г. Витебске, в семье георгиевского кавалера, инженера и „красного директора“ И.К. Алфёрова. Перед Второй мировой войной семья много перемещалась по стране, следуя новым назначениям отца, а после войны вернулась в Минск. Окончив среднюю школу и проучившись несколько семестров в Белорусском политехническом институте, Жорес переехал в Ленинград и поступил в электротехнический институт (ЛЭТИ), который окончил в 1952 г. В следующем году Ж.И. Алфёров был принят младшим научным сотрудником в Ленинградский физико-технический институт (впоследствии — ФТИ им. А.Ф. Иоффе). Здесь Алфёров проработал более 50 лет; известие о присуждении Нобелевской премии по физике за 2000 г. застало его занимающим должность директора ФТИ.

Первые крупные научные и инженерные достижения Ж.И. Алфёрова относятся ко времени работы в лаборатории В.М. Тучкевича. В 1953 г. коллектив с участием Алфёрова создает первые советские транзисторы с $p-n$ -переходом. Спустя пять лет младший научный сотрудник Алфёров участвует в выполнении важного и срочного правительственного задания — в конструировании и создании специальных полупроводниковых устройств для подводных лодок. На следующий год за эту работу он получает „Знак Почета“ — свой первый орден.

Защитив кандидатскую диссертацию в 1961 г., Алфёров вскоре обращается к тематике, ставшей главным делом его научной жизни. В основу будущего могучего научного направления легли три составляющие: своевременно выбранная простая, но верная идея, упорство в достижении цели и удача. Жорес Алфёров исходил из общего представления о том, что возможности полупроводниковых приборов с $p-n$ -переходами многократно расширятся, если научиться изготавливать их на контактах материалов с различной зонной структурой. Речь шла о полупроводниковых кристаллах, в которых материалы с различающимся химическим составом „срослись“ бы друг с другом без нарушения порядка кристаллической решетки! Идея, теперь кажущаяся совершенно естественной, в начале 1960-х годов представлялась большинству специалистов утопической. Для ее реализации требовались последовательность и упорство — того и другого Жоресу Алфёрову было не занимать. Удача же состояла в том, что исследования происходили в ФТИ, одном из ведущих мировых центров по физике твердого тела, и у Жореса Ивановича была возможность привлечь к решению конкретных задач ряд превосходных, самых лучших специалистов в нескольких дополняющих друг друга областях физики и химии.

К 1968 г. обозначилась конкретная, знаковая цель — получение лазера на основе двойной гетероструктуры, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре. В условиях острой конкуренции с несколькими научными группами „команда“ Алфёрова первой получила желанный результат, опередив на месяц И. Хаяши и М. Паниша из Bell Telephone. Не снижая

набранного темпа, за одну „пятилетку“ (1969–1973 гг.) Алфёров и его коллеги-ученики продемонстрировали прототипы нескольких важнейших полупроводниковых приборов, реализующих основные преимущества гетеропереходной технологии: биполярного транзистора, тиристора, солнечного элемента, высокоэффективного светодиода. В это время при прямом и деятельном участии группы Ж.И. Алфёрова были заложены основы всей современной оптоэлектроники.

Начиная с 1980-х годов Алфёров во главе своей научной школы участвует в создании „нанотехнологий“ — по сути дела, адаптируя разработанную ранее методику создания гетеропереходов к малым (нанометровым) пространственным размерам. Из приборов нового поколения можно выделить лазеры на гетероструктуре с „квантовой ямой“, а впоследствии — с „квантовыми точками“, новые поколения солнечных элементов. Все чаще Алфёров выходит за рамки сугубо научной деятельности. В 1989 г. его избирают народным депутатом СССР, в 1990 г. — вице-президентом Академии наук, начиная с 1995 г. Ж.И. Алфёров является депутатом Государственной Думы всех созывов. При этом Алфёров, не скрывая, говорит о том, что своей главной задачей в политике видит защиту интересов науки, и особенно — Академии наук, от малокомпетентных посягательств. Одновременно Алфёров на протяжении 35 лет настойчиво, последовательно, не смущаясь государственными кризисами, проводит в жизнь свою идею о создании линии непрерывного физико-технического образования — от школьной парты до аспирантуры. Созданные Ж.И. Алфёровым и успешно функционирующие Физико-техническая школа и Академический университет будут такими же памятниками нашему выдающемуся современнику, как и его научные труды, как созданная им научная школа, его блестящие научно-популярные лекции и глубокие мысли о настоящем и будущем России.

Для российского научного сообщества уход Ж.И. Алфёрова знаменует окончание эпохи. В нашей

стране на данный момент (впервые с 1956 г.) не осталось здравствующих ученых, носящих знак высшего мирового признания заслуг — звание нобелевского лауреата. Разумеется, в различных областях науки остаются еще крупные ученые, заслуженно пользующиеся известностью в профессиональном сообществе. Однако с кончиной Ж.И. Алфёрова утрачена одна из немногих нитей, связывающих научный мир с властными коридорами. С государственных высот лица и мнения научных светил не всегда легко различимы. Академик Алфёров был узнаваем персонально, „в лицо“; этому способствовали не только его блестящие достижения как ученого и организатора науки, но и масштаб личности — последовательная гражданская позиция, твердость в достижении цели, живой ум и прекрасные ораторские качества.

В автобиографиях, написанных по различным поводам, — в основном, к юбилеям — академик Алфёров вновь и вновь вспоминает важную для себя фразу — девиз Сани Григорьева из каверинских „Двух капитанов“: „Бороться и искать, найти и не сдаваться!“. И всякий раз Алфёров добавляет: „Очень важно при этом понимать, за что борешься“.

В своей нобелевской лекции Жорес Алфёров выделил несколько фундаментальных физических явлений, предсказанных и обнаруженных членами его коллектива в ходе исследований. Одним из этих явлений был эффект „сверхинжекции“ в $p-n$ -гетеропереходе, заключающийся в том, что при токовой инжекции в узкозонный материал концентрация инжектированных носителей может многократно превысить исходную концентрацию в широкозонном эмиттере. Теоретически это явление было предсказано в работе Алфёрова, Халфина и Казаринова, опубликованной в нашем журнале в 1966 г. (английский перевод — в 1967 г.). В знак глубокого уважения к памяти Ж.И. Алфёрова редколлегия ФТТ приняла решение заново перепечатать (в восьмом выпуске текущего года) эту небольшую статью, впервые увидевшую свет 53 года тому назад.

Редколлегия журнала ФТТ

Об одной особенности инжекции в гетеропереходах

© Ж.И. Алфёров, В.Б. Халфин, Р.Ф. Казаринов

Вследствие различия сродства электронов и благодаря разнице в ширине запрещенной зоны на границе раздела двух полупроводников в гетеропереходе возникают разрывы зон ΔE_c и ΔE_v (рис. 1). В таком $p-n$ -гетеропереходе наличие разрыва ΔE_c будет препятствовать инжекции электронов в широкозонный полупроводник и в результате будет иметь место односторонняя инжекция дырок в узкозонный материал. Эта особенность инжекции в гетеропереходе теоретически была рассмотрена в ряде работ [1,2] и экспериментально подтверждена нами при исследовании гетеропереходов GaP–GaAs [3].

Наличие разрыва в валентной зоне ΔE_v уменьшает барьер для инжектируемых дырок. Если к данному переходу применима диффузионная или диодная теория, то токи инжектированных электронов и дырок, кроме несущественных в данном случае множителей, связанных с подвижностью и концентрацией, отличаются на фактор $e^{-\frac{\Delta E_c + \Delta E_v}{kT}}$. При этом если предположить постоянство в слое объемного заряда квазиуровня Ферми для дырок, то при некотором значении приложенного напряжения плотность инжектированных дырок p_n должна превышать плотность их в исходном материале N_a . Эта особенность инжекции в гетеропереходе никем не отмечалась, и ее реализация создает новые возможности для

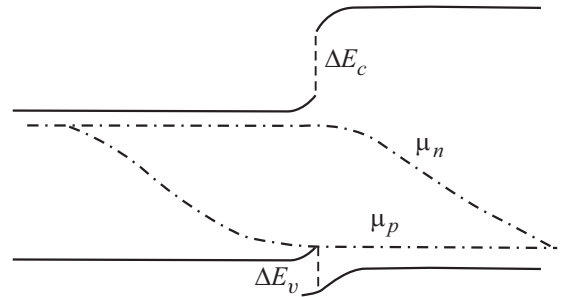


Рис. 2. Зонная модель $p-n$ -гетероперехода при приложении напряжения в пропускном направлении.

различных полупроводниковых приборов. Рассмотрим этот вопрос несколько подробнее.

При приложении смещения к гетеропереходу в пропускном направлении начиная с момента, когда концентрация инжектированных носителей $p_n \simeq N_a$, заряд дырок влияет на профиль гетероперехода: по мере роста p_n все большая и большая часть оставшегося барьера будет приходиться на широкозонный полупроводник. Зонная картина гетероперехода, начиная с некоторого приложенного напряжения, приобретает вид, показанный на рис. 2.

Считая ток в n -области диффузионным и для простоты полагая мономолекулярный закон рекомбинации

$$\frac{j}{q} \equiv I = \frac{D_p}{L_d} p_n \quad (1)$$

$$p_n = N_a e^{\Delta E_v - V - \nabla \mu}, \quad (2)$$

где V — падение потенциала в слое объемного заряда и $\nabla \mu$ — падение квазиуровня Ферми для дырок в p -области (эффективные массы дырок в обоих полупроводниках считаем одинаковыми, а все энергии выражаем в единицах $\frac{kT}{q}$). Величину $\nabla \mu$ можно найти из уравнения движения для дырок в слое объемного заряда (рекомбинацией в нем пренебрегается)

$$D_p \left(\frac{dp}{dx} + \frac{d\phi}{dx} p \right) = I$$

с граничными условиями $p_{x=x_p} = N_a$; $\frac{d\phi}{dx_{x=x_p}} = 0$, $\phi_{x=x_p} = 0$, $\phi_{x=0} = V$.

Для величины $\nabla \mu$ получаем соотношение

$$e^{-\nabla \mu} = \left(1 - \frac{I}{N_a D_p} \int_0^{x_p} e^{\phi} dx \right). \quad (3)$$

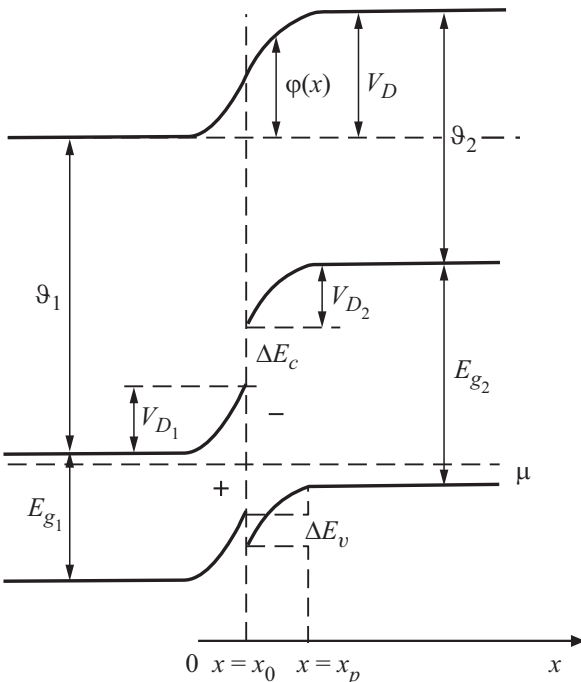


Рис. 1. Зонная модель резкого $p-n$ -гетероперехода.

Подставив (3) в (2), получаем

$$p_n = N_a e^{\Delta E_v - V} \left(1 - \frac{p_n}{N_a L_d} \int_0^{x_p} e^{\varphi} dx \right). \quad (4)$$

Если $V \gg 1$, то

$$\varphi(x) = \left(\frac{x - x_p}{l_d} \right)^2; \quad \left(\frac{x_p}{l_d} \right)^2 \gg 1,$$

где

$$l_d = \left\{ \frac{4\pi q^2 N_d}{\varepsilon k T} \right\}^{-1/2}.$$

Интеграл в (4) можно взять приближенно

$$\int_0^{x_p} e^{\left(\frac{x-x_p}{l_d}\right)^2} dx - l_d \int_0^{\frac{x_p}{l_d}} e^{x^2} dx \simeq l_d e^{\left(\frac{x_p}{l_d}\right)^2} \left(2 \frac{x_p}{l_d} \right)^{-1} = \frac{l_d e^V}{2\sqrt{V}},$$

и уравнение для p_n записывается в виде

$$p_n = N_a e^{\Delta E_v - V} \left(1 - \frac{p_n}{N_a} \frac{l_d}{L_d} \frac{e^V}{2\sqrt{V}} \right). \quad (5)$$

Пока

$$\frac{p_n}{N_a} \frac{l_d}{L_d} \frac{e^V}{2\sqrt{V}} \ll 1, \quad (6)$$

$$p_n = N_a e^{\Delta E_v - V}. \quad (7)$$

Этот случай соответствует постоянству квазиуровня Ферми для дырок. Максимально достижимое отношение $\frac{p_n}{N_a} = e^{\Delta E_v} < \frac{L_d}{l_d}$ ($\frac{p_n}{N_a} = e^{\Delta E_c}$ для n - p -гетероперехода).

Если условие (6) не выполняется, очевидно, $p_n \ll N_a e^{\Delta E_v - V}$ и, следовательно, выражение в скобках в (5) близко к нулю. Тогда

$$p_n = N_a \frac{L_d}{l_d} 2\sqrt{V} e^{-V}. \quad (8)$$

При достаточно малых V p_n становится также больше N_a . Естественно, что вышеприведенный расчет показывает лишь, что максимальное значение p_n может быть больше N_a и должно быть меньше $\frac{L_d}{l_d} N_a$ и не пригоден для точного нахождения $p_{n \max}$. Вместе с тем условие $\frac{L_d}{l_d} \gg 1$, на котором собственно и основана возможность получения $p_n > N_a$ выполняется при любых разумных предположениях о законе рекомбинации, типе диффузии носителей и степени вырождения. Таким образом, полученный качественный результат является достаточно общим.

Подобный расчет можно сделать и для диодной модели перехода. Для зонной картины рис. 2 поток дырок справа налево: $I = v_t N_a e^{-V}$, v_t — тепловая скорость. Диффузионный поток дырок: $I = v_d p_n$, $v_d = \sqrt{\frac{D}{\tau}}$ — „диффузионная“ скорость.

$$\frac{p_n}{N_a} = \frac{v_t}{v_d} e^{-V},$$

и так как $\frac{v_t}{v_d} \gg 1$, то можно достигнуть $\frac{p_n}{N_a} > 1$.

Список литературы

- [1] H. Krömer. Proc. IRE **45**, 1535, 1957.
- [2] R.L. Anderson. Sol. St. Electron. **5**, 341, 1962.
- [3] Ж.И. Алфёров, Д.З. Гарбузов. ФТТ **7**, 2375, 1965.