

ШУМ $1/f$ И ДОЛГОВРЕМЕННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В GaAs

Дьяконова Н. В., Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л.

Исследованы шум $1/f$ и кинетика долговременной релаксации фотопроводимости в чистом эпитаксиальном GaAs. Ранее для аналогичных образцов GaAs было показано, что шум $1/f$ в этом материале имеет объемную природу и обусловлен флуктуациями числа носителей на уровнях «хвоста» плотности состояний вблизи зоны проводимости. В настоящей работе показано, что за долговременную релаксацию фотопроводимости ответственны те же уровни, которые вызывают шум $1/f$ в GaAs.

Хорошо известно, что кинетика релаксации фотопроводимости в чистых, структурно совершенных эпитаксиальных пленках n -GaAs ($N_d \sim 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$) имеет сложный характер. Даже при низких уровнях возбуждения наряду с постоянными времени релаксации $10^{-7} \div 10^{-8} \text{ с}$ в кинетике спада фотопроводимости при комнатной температуре присутствуют времена релаксации $\tau \sim 10^{-1} \div 10^{-3} \text{ с}$ (см., например, [1, 2]). Последовательное объяснение появления столь больших значений τ до настоящего времени отсутствует.

Недавно в работе [3] была сформулирована модель объемного шума $1/f$ в полупроводниках, позволившая качественно объяснить все основные экспериментальные результаты по исследованию шума $1/f$ в чистых эпитаксиальных пленках n -GaAs [4, 5]. В этой работе мы покажем, что предложенный в модели механизм, ответственный за возникновение шума $1/f$, качественно объясняет и наличие долговременной релаксации фотопроводимости в GaAs. Из модели следуют определенные выводы о характере температурной зависимости долговременной релаксации и ее гашении подсветкой. Показано, что эти выводы подтверждаются экспериментально.

Качественная модель шума $1/f$ и долговременной релаксации фотопроводимости

Предложенная в [3] для объяснения природы шума $1/f$ модель основывается на том, что в реальных полупроводниковых монокристаллах несовершенство кристаллической решетки приводит к формированию «хвостов» плотности состояний, спадающих в глубь запрещенной зоны (рис. 1). Флуктуации заполнения уровней, образующих «хвост», могут, как показано в [3], приводить к возникновению шума типа $1/f$. В [3] рассмотрены два варианта модели. В первом варианте сечение захвата электронов на уровни, образующие хвост, считается не зависящим от энергии уровня \mathcal{E} . В этом варианте модели широкий диапазон времен релаксации τ , необходимый для формирования шума $1/f$, возникает вследствие зависимости τ от энергетического положения уровня [6]. Очевидно, что в этом случае имеется максимальное время релаксации τ_0 , связанное с флуктуациями заполнения уровней в хвосте, лежащих ниже уровня Ферми \mathcal{E}_F (рис. 1) [3, 6]:

$$\tau_0 = (\sigma_n v_T n_0)^{-1}, \quad (1)$$

где σ_n — сечение захвата электронов на уровни в хвосте, v_T — тепловая скорость электронов, $n_0 = N_d$ — равновесная концентрация электронов.

Во втором варианте модели, согласно многофононной модели захвата, принимается, что

$$\tau_0(\varepsilon) = \tau_0(0) e^{\varepsilon/\varepsilon_1} \equiv \tau_{00} e^{\varepsilon/\varepsilon_1}, \quad (2)$$

где τ_0 — постоянная времени для уровней при $\varepsilon=0$ (рис. 1), ε_1 — постоянная, характеризующая уменьшение сечения захвата с ростом энергии ε . Очевидно, что в этом варианте модели максимальное время релаксации может быть сколь угодно большим.

Рассмотрим кинетику спада собственной фотопроводимости при наличии хвоста плотности состояний. Пусть образец освещен светом, создающим в полупроводнике электроны и дырки (рис. 2). При освещении наряду со свободными дырками в валентной зоне имеется определенная концентрация дырок, захваченных на рекомбинационный уровень ε_i и на уровни в хвосте. Реально в GaAs

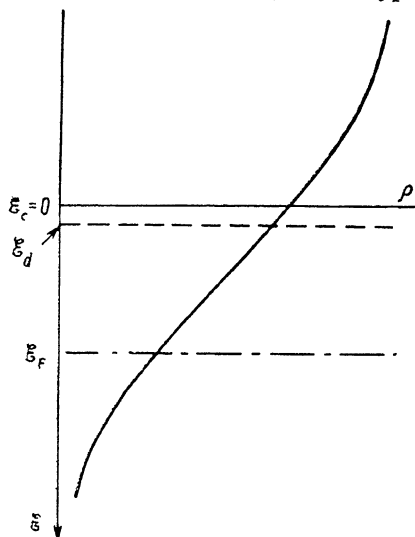


Рис. 1. Хвост плотности состояний и положение уровня Ферми ε_F в модели [3].

ε_d — положение мелкого донорного уровня с концентрацией N_d . В соответствии с экспериментальной ситуацией принимается, что величина N_d много больше концентрации всех других уровней в запрещенной зоне.

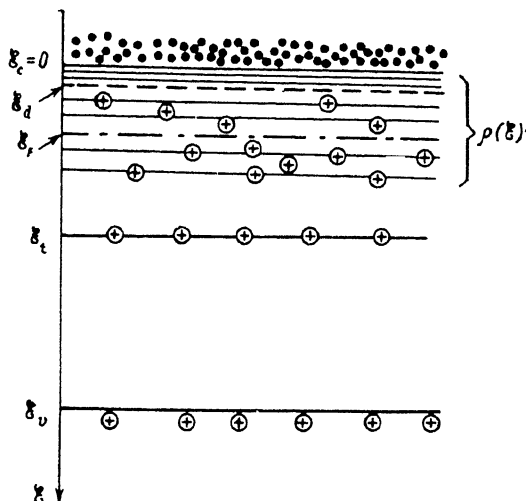


Рис. 2. Схема уровней, поясняющая кинетику в GaAs.

существует несколько рекомбинационных уровней (см., например, [7]), однако для дальнейшего это обстоятельство несущественно. Время жизни избыточных носителей при рекомбинации через любой из этих уровней не превышает 10^{-5} – 10^{-6} с [7].

После выключения света свободные дырки и дырки на рекомбинационных центрах исчезают за время, во всяком случае меньше 10^{-5} – 10^{-6} с. Остаются дырки, захваченные на уровни в хвосте, и избыточные электроны, число которых равно полному числу захваченных дырок. Эти избыточные электроны и определяют избыточную проводимость после выключения света [1, 8]. Захваченные на уровни в хвосте дырки исчезают, рекомбинируя с электронами зоны проводимости. При этом, исходя из рассмотренной выше картины, следует ожидать, что кинетика спада фотопроводимости будет характеризоваться широким диапазоном времен релаксации τ . Если справедлив первый вариант модели, то максимальная постоянная времени спада фотопроводимости будет равна τ_0 , определяемому выражением (1). Именно с этой постоянной времени избыточные электроны из зоны проводимости будут захватываться на уровни в хвосте, лежащие ниже уровня Ферми ε_F (рис. 2). Если справедлив второй вариант модели, то величина максимальной постоянной времени спада фотопроводимости теоретически может быть сколь угодно большой.

В рассматриваемой картине для рекомбинации электрона и дырки, захваченной на уровень в хвосте, не нужно преодолевать никакого энергетического барьера. Поэтому следует ожидать, что кинетика спада фотопроводимости будет относительно слабо зависеть от температуры. Этим рассматриваемый механизм долговременной релаксации принципиально отличается от двух других, хорошо известных механизмов: релаксации, вызванной наличием уровней прилипания [9], и долговременной релаксации, обусловленной наличием в полупроводнике пространственно неоднородных энергетических барьеров [10]. В обоих последних случаях рекомбинация связана с преодолением энергетических барьеров и, как следствие, постоянная времени спада экспоненциально возрастает с понижением температуры.

Для рассматриваемого механизма фотопроводимости должна существовать и характерная особенность в гашении долговременной фотопроводимости подсветкой. При наличии уровней прилипания или барьерного механизма к гашению долговременной релаксации приводит так называемая «инфракрасная подсветка», т. е. освещение полупроводника светом с энергией фотонов $\mathcal{E}_\phi < \mathcal{E}_g$. Поскольку рассматриваемый механизм релаксации не связан с преодолением энергетического барьера, инфракрасное гашение в данном случае не должно наблюдаться. С другой стороны, если существует непрерывная подсветка образца светом с энергией квантов $\mathcal{E}_\phi \geq \mathcal{E}_g$, создающая (пусть и в относительно небольшой концентрации) дырки, долговременная релаксация может оказаться подавленной. Действительно, если создаваемых подсветкой дырок достаточно, чтобы заполнить наиболее глубокие уровни в хвосте, число которых экспоненциально мало, а время релаксации для которых максимально, то соответствующие (наибольшие) времена релаксации в кинетике спада не должны наблюдаться.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Кинетика спада фотопроводимости исследовалась на образцах, полностью аналогичных тем, на которых ранее исследовался шум $1/f$ [4, 5]. Эпитаксиальный n -GaAs с концентрацией $N_d \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ выращивался методом газовой эпитаксии на n^+ -подложке. Подвижности электронов при комнатной температуре $\mu \sim 7 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, при 77 К $\mu \sim 6 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Размеры и форма образцов показаны на вставке к рис. 3.

На рис. 3 для двух образцов, изготовленных из разных пластин GaAs, показаны зависимости относительной стационарной фотопроводимости $\Delta\sigma/\sigma_0$ от энергии фотонов возбуждающего света. Зависимости получены с использованием точечной лампы накаливания мощностью 80 Вт и монохроматора МДР-6.

В обоих образцах темновой низкочастотный шум имел вид типа $1/f$, был практически одинаков по интенсивности (см. вставку на рис. 3) и соответствовал постоянной Хоуге $\alpha \approx 10^{-4}$ [4, 5]. При освещении спектр шума в образце 1 изменялся в соответствии с результатами, описанными в [4, 5] и проанализированными в [3]. Спектр шума в образце 2 при освещении сохраняет вид $1/f$; уровень шума слегка возрастает.

Из рис. 3 видно, что зависимость $\Delta\sigma/\sigma_0$ от \mathcal{E}_ϕ качественно одинакова для образцов 1 и 2. В обоих случаях максимуму фотопроводимости ($\Delta\sigma/\sigma_0 \sim 1\%$) соответствует энергия фотонов $\mathcal{E}_\phi \approx \mathcal{E}_g$ (\mathcal{E}_g — ширина запрещенной зоны GaAs, составляющая ≈ 1.42 эВ для 300 К [11]). Для образца 1 показана зависимость $\Delta\sigma/\sigma_0$ от энергии фотонов при 77 К (кривая 1'). Видно, что максимум фотопроводимости также соответствует условию $\mathcal{E}_\phi \approx \mathcal{E}_g$ (для 77 К $\mathcal{E}_g \approx 1.51$ эВ [11]). Заметим, что фотоны с теми же значениями энергии $\mathcal{E}_\phi \approx \mathcal{E}_g$ оказывают максимальное влияние на спектр низкочастотного шума [5].

На рис. 4 показаны типичные зависимости $\Delta\sigma/\sigma_0$ от времени для образца 1 при 300 и 77 К. Фотопроводимость при каждой температуре возбуждалась светом с энергией фотонов \mathcal{E}_ϕ , соответствующей максимумам $\Delta\sigma/\sigma_0$ на рис. 3. Показанные на рисунке зависимости получены в условиях, когда перед входной щелью монохроматора помещался механический модулятор. На вставке

к рис. 4 показана кинетика спада фотопроводимости, возбуждаемой в том же образце импульсом света GaAs-лазера длительностью $\sim 10^{-7}$ с. Из сравнения кривой на вставке к рис. 4 и кривой I на рис. 4, соответствующей одной и той же температуре (300 К), видно, что в зависимости $\Delta\sigma/\sigma_0$ от времени присутствует широкий набор постоянных времени τ . Из сравнения кривых I и 2 (рис. 4) видно, что изменение температуры от 300 до 77 К не сказывается качественно на кинетике спада фотопроводимости.

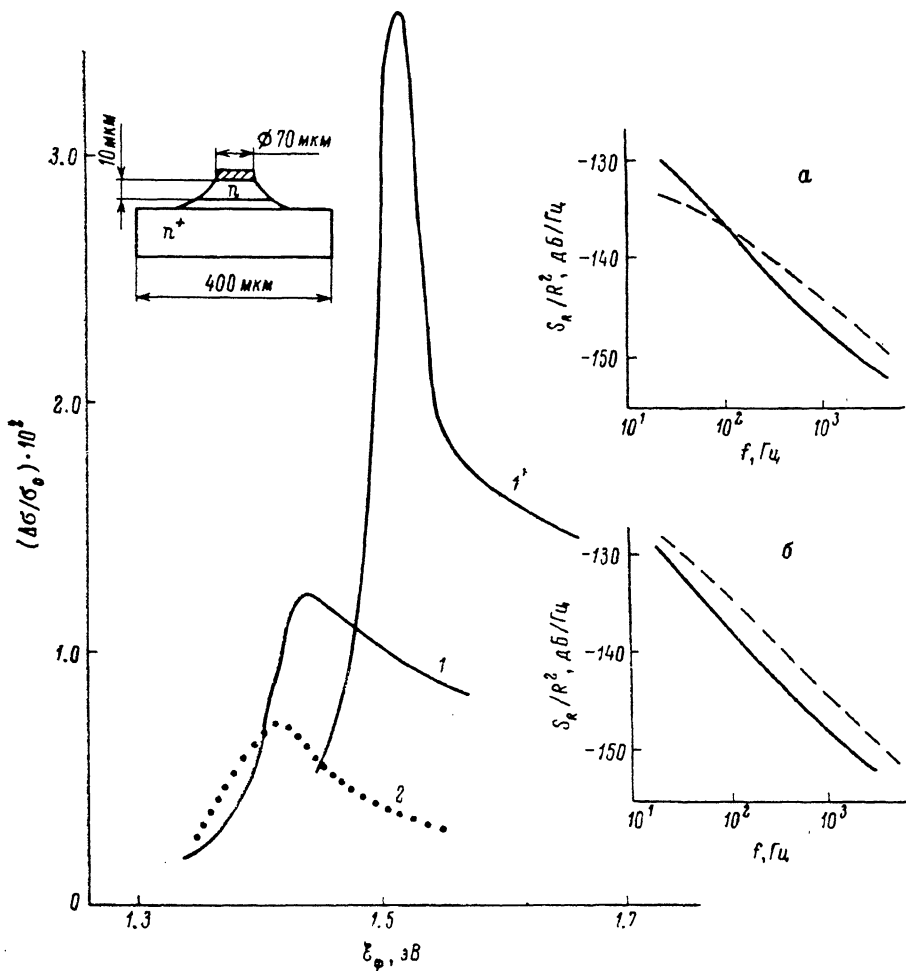


Рис. 3. Зависимость стационарной фотопроводимости от энергии фотонов возбуждающего света.

Номер образца: $1, 1' - 1; 2 - 2$. $T, K: 1, 2 - 300; 1' - 77$. На вставке слева — размер и форма образцов. На вставках справа — зависимости спектральной плотности шума при 300 К. $a -$ для образца 1, $б -$ для образца 2. Сплошные кривые — темновой шум, штриховые — шум при подсветке [s^{-5}].

На рис. 5 показаны зависимости $\Delta\sigma/\sigma$ от времени при 300 К для тех же образцов 1 и 2, что и на рис. 3. Видно, что в отсутствие подсветки (кривые I и 2) ход зависимостей $\Delta\sigma(t)$ качественно одинаков. В кинетике спада для обоих образцов присутствуют большие постоянные времена (вплоть до $\tau \sim 10^{-1}$ с). Кривые $1'$ и $2'$ получены при подсветке образцов постоянным светом лампы накаливания. Видно, что в кинетике спада фотопроводимости образца 2 большие постоянные времена сохраняются (кривая $2'$). Для образца 1 (кривая $1'$) характерно исчезновение больших значений τ при подсветке.

Вставки на рис. 5 дают возможности убедиться в том, что за подавление долговременной фотопроводимости ответственны фотоны с энергией $\epsilon_\phi \approx \epsilon_g$. На вставке a (кривая I) виден спад фотопроводимости, возбуждаемой импуль-

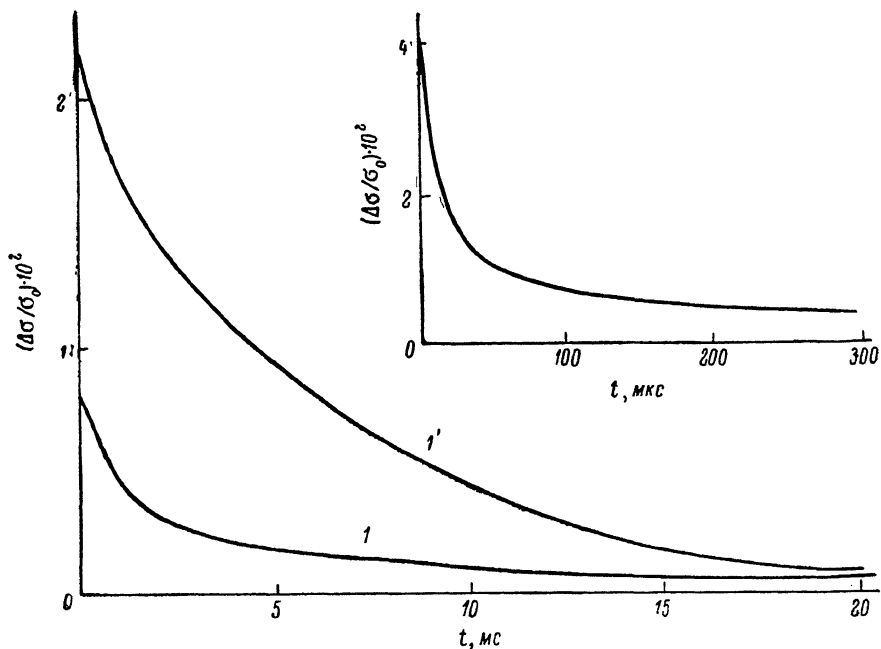


Рис. 4. Кинетика спада фотопроводимости при 300 (I) и 77 К (I') для образца 1.

На вставке — временная зависимость $\Delta\sigma/\sigma_0$ для того же образца при возбуждении импульсом света GaAs-лазера (300 К).

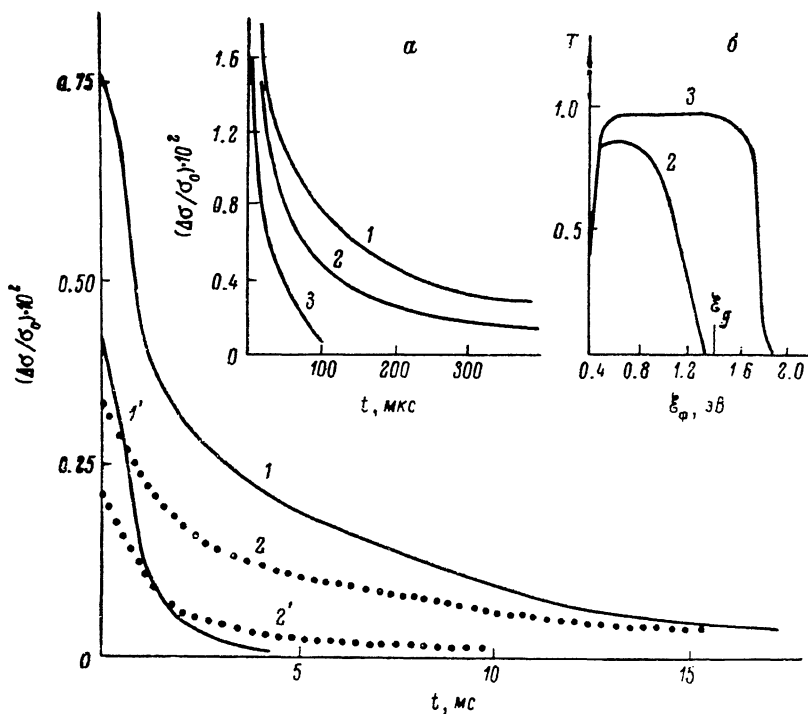


Рис. 5. Кинетика спада фотопроводимости при 300 К для образцов 1 (I, I') и 2 (2, 2') (см. рис. 3).

Возбуждение светом лампы накаливания, пропущенным через монохроматор. $\epsilon_\phi = 1.42$ эВ. Механический модулятор: 1, 2 — без подсветки, I', 2' — с подсветкой дополнительной лампой накаливания. На вставках: а) кинетика спада фотопроводимости при возбуждении импульсом лазера, б) спектры пропускания фильтров: 2 — ИКС-3, 3 — КС-19.

сом лазера, без подсветки. Кривой 2 соответствует спад фотопроводимости в условиях, когда образец подсвечивался светом лампы накаливания через фильтр ИКС-3, практически полностью поглощающий кванты с энергией $\varepsilon_{\phi} \approx \approx \varepsilon_g \approx 1.42$ эВ (спектр пропускания фильтра соответствует кривой 2 на вставке б). Видно, что долговременная релаксация сохраняется в кинетике спада без изменений. Кривая 3 на вставке а показывает спад фотопроводимости при подсветке образца через фильтр КС-19. Этот фильтр, спектр пропускания которого соответствует кривой 3 на вставке б, практически полностью пропускает фотоны с энергией, равной ε_g . Из сравнения кривых 1—3 на вставке а ясно, что за подавление долговременной релаксации ответственны фотоны с энергией $\varepsilon_{\phi} \approx \varepsilon_g$, обуславливающей появление дырок в объеме образца (ср. с рис. 3). Следует отметить, что наблюдающееся подавление долговременной релаксации подсветкой с энергией фотонов $\varepsilon_{\phi} \approx \varepsilon_g$ полностью коррелирует с влиянием подсветки на шум $1/f$ (см. вставки на рис. 1).

Действительно, как видно из вставки а, для образца 1 подсветка подавляет шум на низких частотах $f \leq 200$ Гц. Это означает, что в шумовом спектре подавляются флуктуации с постоянными времени релаксации $\tau \geq 5 \cdot 10^{-3}$ с. В работах [4, 5], где это явление было впервые описано, показано, что за эффект подавления ответственны фотоны с энергией $\varepsilon_{\phi} \approx \varepsilon_g$. Таким образом, подсветка с энергией квантов $\varepsilon_{\phi} \approx \varepsilon_g$ приводит в образце 1 к подавлению больших постоянных времени и в шуме $1/f$, и в долговременной релаксации фотопроводимости. Напротив, в образце 2 шум $1/f$ на низких частотах светом не подавляется (см. вставку б на рис. 1). Как видно из рис. 5, для этого образца отсутствует и подавление подсветкой долговременной релаксации фотопроводимости.

Следует отметить также, что при пониженных ($T \leq 200$ К) температурах, как было качественно объяснено в работе [12], подсветка (в том числе и при $\varepsilon_{\phi} \approx \varepsilon_g$) не приводит к подавлению шума $1/f$. Эксперимент показывает, что при 77 К подсветка не приводит также к подавлению долговременной релаксации фотопроводимости.

Из приведенных экспериментальных результатов следует, что температурная зависимость кинетики фотопроводимости и влияние подсветки полностью согласуются с выводами изложенной выше качественной модели долговременной релаксации фотопроводимости в GaAs. Результаты дают серьезные доказательства в пользу предположения, что за объемный шум $1/f$ и долговременную релаксацию фотопроводимости в GaAs ответственны одни и те же уровни. Эти уровни соответствуют, по-видимому, хвосту плотности состояний вблизи края зоны проводимости, анализ влияния которого на шум $1/f$ проделан в работе [3].

Авторы искренне признательны С. Д. Барановскому, М. И. Дьяконову и А. Я. Шику за помощь и полезные дискуссии.

Список литературы

- [1] Acket G. A. // Phil. Res. Rept. 1971. V. 26. N 4. P. 261—278.
- [2] Колчанова Н. М., Литовченко Н. М., Родионов В. Е. // Полупроводн. техн. и микроэлектрон. 1979. № 29. С. 28—31.
- [3] Дьяконова Н. В., Левинштейн М. Е. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 2. С. 283—291.
- [4] Вайнштейн С. Н., Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л. // Письма ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 11. С. 645—648.
- [5] Дьяконова Н. В., Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 6. С. 1049—1052.
- [6] Copeland G. A. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1971. V. ED-18. N 1. P. 50—53.
- [7] Ботнарюк В. М., Жилиев Ю. В., Кечек А. Г., Кузнецов Н. И., Лебедев А. А., Шульга М. И. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 2. С. 181—185.
- [8] Acket G. A., Scheer J. J. // Sol. St. Electron. 1971. V. 14. N 1. P. 167—174.
- [9] Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., 1963. 494 с.
- [10] Шейнман М. К., Шик А. Я. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 2. С. 209—233.
- [11] Blakemore J. S. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 10. P. R123—R181.
- [12] Дьяконова Н. В., Левинштейн М. Е. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 21. С. 1978—1982.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 29.05.1989
Принята к печати 30.05.1989