

ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕТА НА ПРОЦЕСС ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ P⁺ В Si

В. В. Артамонов, М. Я. Валах, А. В. Денисов,
В. Н. Мордкович, Б. Д. Нечипорук

Институт полупроводников Академии наук Украины, 252650, Киев, Украина
(Получена 28.05.1992. Принята к печати 8.06.1992)

Методами спектроскопии комбинационного рассеяния света изучено влияние подсветки в процессе имплантации в Si ионов P⁺ на разупорядочение структуры Si. Установлено, что подсветка приводит к увеличению размеров микрокристаллитов и объемного содержания кристаллической фазы в имплантируемом слое по сравнению с имплантацией без подсветки, а в аморфной фазе — к уменьшению величины отклонения углов связей ($\Delta\theta$) от идеальной тетраэдрической координации.

В настоящее время широко используется модификация структуры и свойств приповерхностных слоев твердых тел путем воздействия ионными, электронными или лазерными пучками. В полупроводниковом материаловедении и микроэлектронной технологии наиболее широко используется ионная имплантация. Она позволяет легко управлять количеством и распределением инжектированных атомов. Проблема сопровождающего имплантацию разупорядочения структуры (вплоть до аморфизации при больших дозах) решается с помощью использования последующих отжига, которые одновременно обеспечивают и электрическую активацию имплантированных атомов легирующей примеси. Для отжига имплантационных дефектов применяются термическое, ионно-лучевое и лазерное воздействия.

В последние годы появилось несколько работ [1-3], в которых было показано, что в процессе светового облучения аморфных слоев может происходить не только изменение их структуры, но и фазовый переход из аморфного состояния в кристаллическое. Целью настоящей работы является изучение влияния светового воздействия в процессе имплантации кристаллического кремния на разупорядочение его структуры.

В качестве метода исследования использовано лазерное комбинационное рассеяние света (КРС), которое позволяет не только качественно, но и количественно характеризовать процессы структурного разупорядочения [4, 5].

Методика эксперимента

Исследовались пластины монокристаллического Si (КЭФ-4.5) *n*-типа проводимости с ориентацией (100), прошедшие стандартную химико-механическую обработку. В пластины при комнатной температуре имплантировались ионы P⁺ с энергией $E = 150$ кэВ в интервале доз $(0.2 \div 3.0) \cdot 10^{15}$ см⁻² при плотности тока $j = 0.1$ мкА/см². Пластины разворачивали на 7°, поэтому эффект каналирования исключался. Одна серия образцов подвергалась имплантации при одновременной подсветке галогенной лампой (удельная мощность ~ 0.1 Вт/см²). Подсветка осуществлялась в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, что достигалось с помощью фильтра, обрезавшего ИК излучение. На другой серии образцов имплантация проводилась в идентичных условиях, но без подсветки.

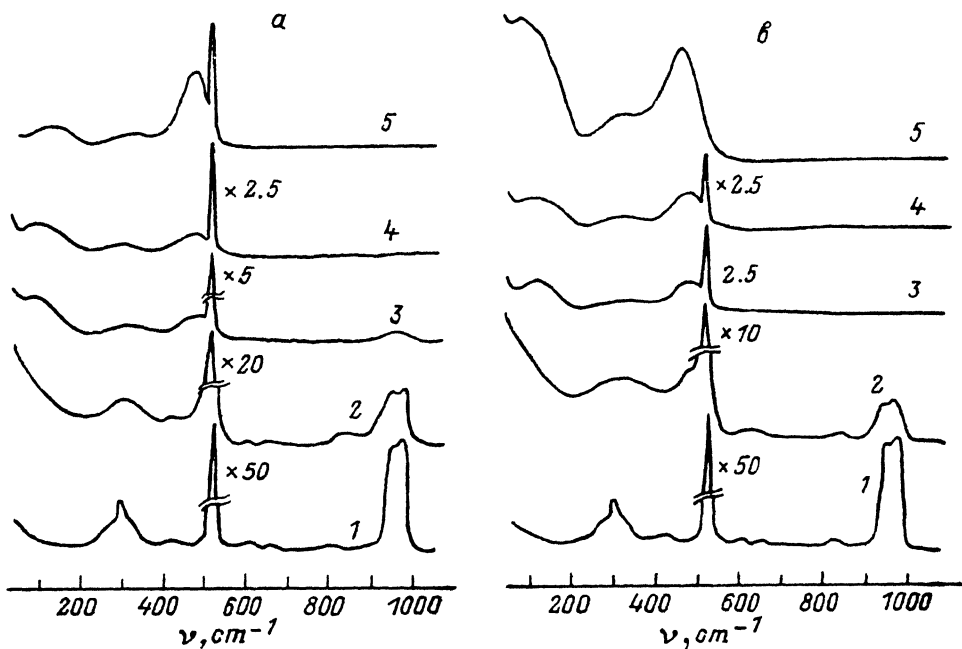


Рис. 1. Спектры КРС Si. а — образцы исходный (1) и имплантированные с подсветкой ионами P^+ (2—5). Дозы, см^{-2} : 2 — $2 \cdot 10^{14}$, 3 — $7.5 \cdot 10^{14}$, 4 — $1 \cdot 10^{15}$, 5 — $3 \cdot 10^{15}$. б — образцы исходный (1) и имплантированные ионами P^+ (2—5). Дозы, см^{-2} : 2 — $2 \cdot 10^{14}$, 3 — $7.5 \cdot 10^{14}$, 4 — $1 \cdot 10^{15}$, 5 — $3 \cdot 10^{15}$.

Спектры КРС измерялись на автоматизированной установке со спектрометром ДФС-24. Для регистрации использовался охлаждаемый ФЭУ-136 в режиме счета фотонов. Источником возбуждения служил аргоновый лазер ($\lambda = 514.5 \text{ нм}$). Во избежание нагрева образцов мощность возбуждающего излучения во всех случаях не превышала 100 мВт, а фокусировка осуществлялась цилиндрической линзой. Геометрия эксперимента соответствовала схеме измерения отражения.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны спектры КРС исходного образца (1) и четырех образцов, имплантированных различными дозами ионов P^+ с подсветкой (а) и без подсветки (б). В спектре исходного образца, кроме рассеяния на длинноволновых оптических фононах центра зоны Бриллюэна, которому отвечает интенсивная симметричная линия при $\nu = 520 \text{ см}^{-1}$ с полушириной $\Gamma = 3.8 \text{ см}^{-1}$, проявляются известные, более слабые структуры при $\nu \approx 300$ и 1000 см^{-1} , обусловленные процессами рассеяния второго порядка на акустических и оптических колебаниях решетки.

С ростом дозы имплантации наблюдаются уменьшение интенсивности фундаментальной полосы рассеяния, сдвиг ее в низкочастотную сторону и асимметричное увеличение полуширины с оттенением низкочастотного крыла. Кроме того, резко уменьшается интенсивность двухфононных полос до полного их исчезновения. Такие изменения спектра КРС являются характерным проявлением разупорядочения кристаллической структуры.

В то же время в спектре возникают и с ростом дозы возрастают две широкие полосы при $\nu \approx 130$ и 480 см^{-1} . Они индуцированы разупорядочением и обусловлены процессами рассеяния на фононах акустической (ТА) и оптической

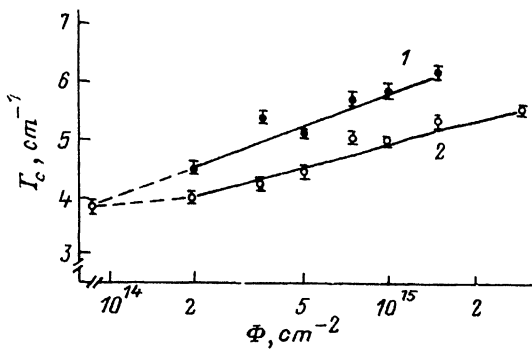


Рис. 2. Зависимости полуширины Γ_c фундаментальной полосы КРС Si от дозы имплантированных ионов P^+ без подсветки (1) и с подсветкой (2) в процессе имплантации.

(ТО) ветвей с произвольным волновым вектором. Полоса $\nu = 480 \text{ см}^{-1}$ является известной характеристической полосой аморфной фазы Si. Эти изменения свидетельствуют о том, что с увеличением дозы имплантации происходят уменьшение объемного содержания кристаллической и увеличение аморфной фаз.

Из сравнения *a* и *b* (рис. 1) видно, что в случае подсветки все отмеченные изменения спектров КРС происходят в меньшей мере. Так, в результате имплантации без подсветки при дозе $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ исследуемый слой находится полностью в аморфном состоянии, а с подсветкой представляет собой смесь аморфной и кристаллической фаз, о чем свидетельствует присутствие в спектре слабой фундаментальной полосы $\nu = 520 \text{ см}^{-1}$. Таким образом, подсветка образца ультрафиолетовым и видимым излучением в процессе имплантации существенно влияет на процессы разупорядочения кристаллической структуры. Для более детального изучения этого влияния нами далее количественно проанализированы изменения спектров КРС.

Анализ изменений в кристаллической фазе. На рис. 2 показана зависимость полуширины Γ_c полосы $\nu = 520 \text{ см}^{-1}$ от дозы ионов P^+ . Видно, что при имплантации без подсветки происходит монотонное увеличение Γ_c от 3.8 до 6.2 см^{-1} при дозе $\Phi = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ эта полоса в спектре КРС не регистрируется. В случае имплантации с подсветкой полуширина также увеличивается, но в меньшей степени, причем она наблюдается и при $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ($\Gamma_c = 5.5 \text{ см}^{-1}$).

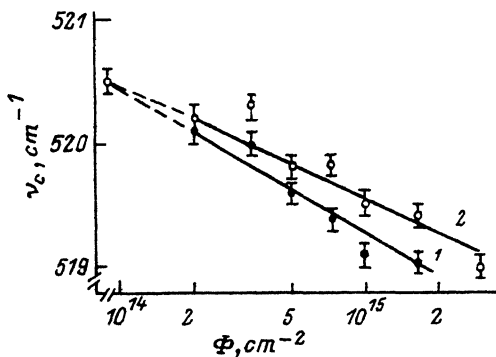


Рис. 3. Зависимости частотного положения ν_c фундаментальной полосы КРС Si от дозы имплантированных ионов P^+ без подсветки (1) и с подсветкой (2) в процессе имплантации.

На рис. 3 показана зависимость частотного положения полосы от дозы имплантации. Видно, что в обоих случаях происходит уменьшение ν_c с ростом дозы, причем значения ν_c при имплантации без подсветки ниже, чем с подсветкой.

Полученные результаты могут быть проанализированы на основе модели «пространственной корреляции фононов», используемой для описания размерных эффектов в спектрах КРС при разупорядочении кристаллической структуры [6, 7]. В основе модели лежат соображения о пространственной локализации волновой функции фононов в области, для которой сохраняется упорядоченное расположение атомов. Соответствующая функция $W(r, L)$, модулирующая волновую функцию идеального кристалла, задается, например, распределением Гаусса

$$W(r, L) = A \exp(-q^2 L^2 / 4),$$

где L — длина корреляции. В таком случае выражение для интенсивности КРС в микрокристаллите, аппроксимируемом сферой диаметром L , имеет вид

$$I(\omega) \propto \int \exp(-q^2 L^2 / 4) \frac{d^3 q}{[\omega - \omega(q)]^2 + (\Gamma_0 / 2)^2},$$

где q — волновой вектор, определяемый в единицах, характеризующих размер зоны Бриллюэна, Γ_0 — полуширина фундаментальной полосы КРС исходного идеального монокристалла (т. е. при $L \rightarrow \infty$), $\omega(q)$ — закон дисперсии фононов. Из последнего выражения следует, что размерный эффект обуславливает как уширение полосы рассеяния, так и смещение ее в низкочастотную сторону. При количественном сопоставлении предполагается выбор значений длин корреляции L , при которых рассчитанный асимметричный контур согласуется с экспериментально измеренным.

Так как в случае имплантации без подсветки полуширина больше, а значение ν_c меньше, чем при подсветке, размеры микрокристаллитов в первом случае меньше, чем во втором. Например, при увеличении дозы имплантации от $2 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² без подсветки размеры микрокристаллитов уменьшаются от 60 до 30 Å, а с подсветкой — от 130 до 38 Å. Это свидетельствует о том, что при подсветке замедляется процесс разупорядочения кристаллической структуры.

Эти результаты коррелируют с изменениями интенсивности фундаментальной полосы рассеяния. В работе [8] было предложено использовать для характеристики степени разупорядочения кристаллической структуры Si величину

$$\xi = 1 - \frac{I_{\text{им}}}{I_0},$$

где I_0 — интенсивность фундаментальной полосы исходного образца, а $I_{\text{им}}$ — имплантированного.

На рис. 4 показана зависимость величины ξ от дозы имплантации. Видно, что значения ξ при имплантации без подсветки выше, чем с подсветкой. При $\Phi = 3 \cdot 10^{15}$ см⁻² без подсветки $\xi = 1$, что отражает факт полной аморфизации исследуемого слоя, тогда как при подсветке $\xi < 1$.

Анализ изменений в аморфной фазе. Нами также были проанализированы структурные изменения, протекающие в аморфной фазе. В ряде работ, где обсуждались структурные модели аморфного кремния, показано, что не существует непрерывного топологического перехода от кристаллической структуры к аморфной, и наоборот [9]. Для аморфного кремния устойчивы структуры, в которых среднее квадратичное отклонение углов связей $\Delta\theta$ от идеальной тетраэдрической координации монокристалла Si превышает 6.6°. Структур с промежуточными значениями $0 < \Delta\theta < 6.6^\circ$ не существует, т. е. переход Si из аморфного состояния в кристаллическое, и наоборот, носит скачкообразный характер. При

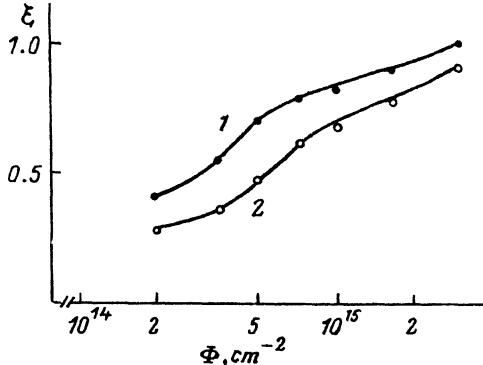


Рис. 4. Зависимость величины ξ от дозы имплантированных ионов P^+ без подсветки (1) и с подсветкой (2) в процессе имплантации.

этом изменение полуширины TO -полосы аморфного кремния ($\nu \approx 480 \text{ см}^{-1}$) в спектре КРС непосредственно коррелирует с величиной $\Delta\theta$ [9]:

$$\Gamma_a^2 = \Gamma_0^2 + \Gamma_\theta^2 = (32)^2 + (6.74 \overline{\Delta\theta})^2,$$

где Γ_a , Γ_0 и Γ_θ выражены в см^{-1} , а $\overline{\Delta\theta}$ — в градусах.

На рис. 5 показаны изменения полуширины TO -полосы Γ_a и величины $\overline{\Delta\theta}$ с дозой имплантации. Видно, что с увеличением дозы до $7.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ величина $\overline{\Delta\theta}$ практически не изменяется, а при бóльших дозах увеличивается. При имплантации без подсветки она изменяется от 8.3 до 12.5° , а с подсветкой — от 7 до 13° . Таким образом, величина $\overline{\Delta\theta}$ при относительно малых дозах имплантации без подсветки имеет большее значение, чем с подсветкой, но с увеличением дозы эта разница уменьшается и при $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ значения $\overline{\Delta\theta}$ практически совпадают. Это свидетельствует о том, что подсветка влияет на степень неравновесности аморфной фазы, так как величина $\overline{\Delta\theta}$ определяет запасенную упругую энергию.

Известно [10], что к изменению частотного положения TO -полосы аморфного Si могут привести три фактора: а) механические напряжения, б) изменения величины $\overline{\Delta\theta}$, в) присутствие значительной концентрации атомов водорода. В нашем случае последнюю причину можно исключить.

Как видно из рис. 6, с увеличением дозы имплантации частота TO -полосы ν_a^{TO} уменьшается, причем ее значение при имплантации без подсветки ниже,

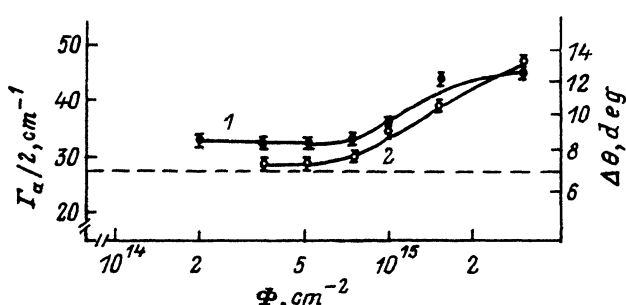


Рис. 5. Зависимость полуширины Γ_a ($\overline{\Delta\theta}$) TO -полосы от дозы имплантированных ионов P^+ без подсветки (1) и с подсветкой (2) в процессе имплантации. Штриховой линией показано минимальное возможное значение величины $\overline{\Delta\theta}$ для α -Si.

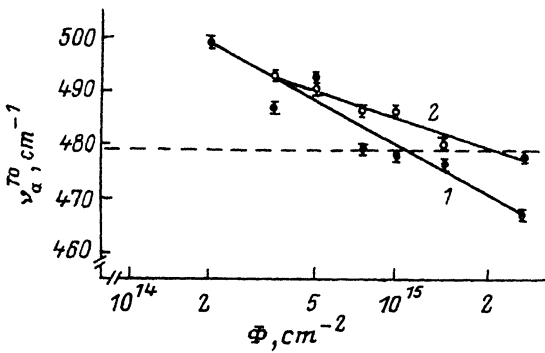


Рис. 6. Зависимость частотного положения ν_a^{TO} TO -полосы a -Si от дозы имплантированных ионов P^+ без подсветки (1) и с подсветкой (2) в процессе имплантации. Штриховой линией показано теоретическое значение частотного положения TO -полосы ненапряженного, беспримесного a -Si.

чем с подсветкой. Так как при $\Phi = 7.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ величина $\overline{\Delta\theta}$ практически не изменяется, смещение полосы в данном диапазоне доз следует связать с уменьшением сжимающих напряжений. При $\Phi = 7.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, где $\overline{\Delta\theta}$ увеличивается, дальнейшее уменьшение ν_a^{TO} , по-видимому, обусловлено как уменьшением сжимающих напряжений, так и ростом $\overline{\Delta\theta}$, поскольку рост $\overline{\Delta\theta}$ также должен приводить к низкочастотному сдвигу [11]. При $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ значения $\overline{\Delta\theta}$ для обоих случаев имплантации одинаковы. Поэтому различия в частотном положении TO -полосы обусловлены лишь действием механических напряжений. Следовательно, при имплантации с подсветкой в аморфной фазе действуют большие сжимающие напряжения, чем без подсветки.

Для количественного определения объемного содержания ρ кристаллической фазы в смешанной системе мы воспользовались соотношением работы [12]

$$\rho = \frac{I_c}{I_c + yI_a} \cdot 100 \%,$$

где I_c и I_a — интегральные интенсивности фундаментальной и TO -полос в спектрах КРС, y — отношение сечений рассеяния кристаллического и аморфного кремния. В литературе приводятся разные значения y — от 0.1 до 0.88. В работе [13] было предложено определять величину y в зависимости от размера микрокристаллитов с использованием выражения

$$y = 0.1 \exp(-L/250),$$

где L — размер микрокристаллитов в \AA .

Воспользовавшись приведенным значением размеров микрокристаллитов, оценим объемное содержание кристаллической фазы в имплантированных образцах. На рис. 7 показана ее зависимость от дозы имплантации. Видно, что в случае имплантации с подсветкой величина ρ превышает соответствующие значения для случая имплантации без подсветки. С увеличением дозы она уменьшается в обоих случаях имплантации, что обусловлено ростом перекрытия отдельных аморфных областей, и при дозе $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ достигает значения $\rho = 0$ в случае имплантации без подсветки. При подсветке ее значение уменьшается только до 50%.

При проникновении энергетического иона в твердое тело кинетическая энергия, сообщаемая атомам решетки при ядерных столкновениях, может быть достаточной, для того, чтобы вызвать смещение атомов и возникновение отдель-

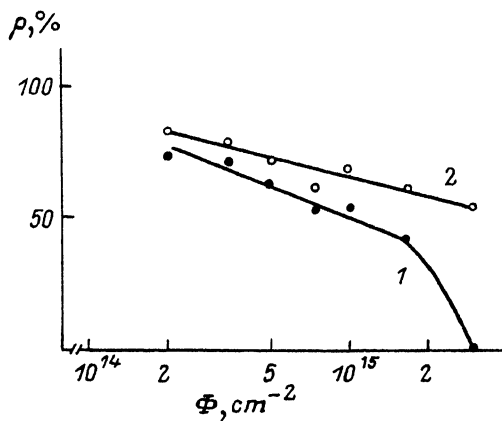


Рис. 7. Изменение объемного содержания кристаллической фазы с дозой имплантированных ионов P^+ без подсветки (1) и с подсветкой (2) в процессе имплантации.

ных аморфных зон, окружающих каждый ионный трек. Увеличение дозы имплантации приводит к тому, что отдельные аморфные зоны начинают перекрываться вплоть до образования сплошного аморфного слоя. Такая картина наблюдается в интервале глубин от $R_p - \Delta R_p$ до $R_p + \Delta R_p$, где R_p — проекционный пробег иона, а ΔR_p — его среднеквадратичное отклонение. В нашем случае $R_p = 187$ нм, а $\Delta R_p = 48$ нм^[15]. На глубинах, отличающихся от указанных, число ядерных соударений невелико и преобладающим типом повреждений должны быть изолированные кластеры, в состав которых входят точечные дефекты, такие как вакансии и междоузельные атомы.

При не слишком низких температурах имплантации нарушение кристаллической структуры происходит под действием двух конкурирующих механизмов — разупорядочения и отжига. Можно предположить, что исследованное нами влияние подсветки в процессе имплантации способствует проявлению механизмов отжига. В пользу этого предположения свидетельствует тот факт, что при подсветке размеры микрокристаллитов больше, а объемное содержание кристаллической фазы в смешанной системе выше. По-видимому, под действием светового излучения происходит развал дефектных комплексов и возникшие при этом вакансии и междоузельные атомы диффундируют к границам раздела аморфных и кристаллических областей, где происходит твердофазная кристаллизация. В этих процессах существенную роль играют нарушенные области, находящиеся на глубинах, меньших $R_p - \Delta R_p$ и больших $R_p + \Delta R_p$, где максимальна концентрация изолированных кластеров.

Возможна другая точка зрения. В работе [15] было показано, что под действием светового излучения в аморфном Si происходят обратимые переходы из одного метастабильного состояния аморфной фазы в другое. Одним из таких возможных метастабильных состояний может быть кластер размером $< 30 \text{ \AA}$ вюрцитной структуры. Если размер такого кластера увеличивается до 30 \AA , то возможна его перестройка в обычную алмазоподобную структуру. Этим авторы работы [15] объясняли квазипериодическое влияние и исчезновение слабой по интенсивности фундаментальной полосы рассеяния в спектре КРС аморфного Si.

Можно предположить, что в случае, когда перестройка такого кластера происходит на границе раздела $\alpha\text{-Si}-c\text{-Si}$, вероятность обратной его перестройки резко уменьшается. Этот процесс, по-видимому, также может вносить свой вклад

увеличение размера микрокристаллитов в случае имплантации с подсветкой, что в конечном итоге ведет к увеличению относительного объема кристаллической фазы в исследуемых слоях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. Н. Денисов, Б. Н. Маврин, В. Б. Подобедов, Г. Г. Скрацкая. ЖЭТФ, 50, 363 (1989).
- [2] I. Abdulhalim, R. Beserman, Yu. L. Khait. J. Non.-Cryst. Sol., 97-98, 387 (1987).
- [3] M. Ohsawa, T. Noma, T. Akasaka, H. Sakai, S. Ishida, Y. Uchida. J. Non-Cryst., 97-98, 91 (1987).
- [4] В. В. Артамонов, М. Я. Валах, М. П. Лисица, В. Г. Литовченко, Б. Н. Романюк, И. В. Рудской, В. В. Стрельчук. ФТП, 22, 1961 (1988).
- [5] V. V. Artamonov, V. S. Lysenko, A. N. Nazarow, V. V. Strelchuk, M. Ya. Valakh. Semicond. Sci. Techn., 6, 1 (1991).
- [6] A. K. Shukla, K. P. Jain. Phys. Rev. B, 35, 9240 (1987).
- [7] H. Richter, Z. P. Wang, L. Ley. Sol. St. Commun., 39, 625 (1980).
- [8] I. H. Campbell, P. M. Fauchet. Sol. St. Commun., 58, 739 (1986).
- [9] K. Mizoguchi, S. Nakashima, A. Fujii, A. Mitsuishi, H. Morimoto, H. Onoda, T. Kato. Japan. J. Appl. Phys., 26, 903 (1987).
- [10] D. Beeman, R. Tsu, M. H. Thorple. Phys. Rev. B, 32, 874 (1985).
- [11] Y. Hishikawa. J. Appl. Phys., 62, 3150 (1987).
- [12] R. Tsu. J. Non.-Cryst., 97-98, 163 (1987).
- [13] T. Okada, T. Iwaki, H. Kasahara, K. Yamamoto. Japan J. Appl. Phys., 24, 161 (1985).
- [14] E. Bustarret, M. A. Hachicha, M. Brunel. Appl. Phys. Lett., 52, 1676 (1988).
- [15] I. Abdulhalim, R. Beserman, R. Weil. Phys. Rev. B, 39, 1081 (1989).

Редактор Л. В. Шаронова
