

ИЗУЧЕНИЕ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО
АЛМАЗА МЕТОДОМ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

А. М. Зайцев

УДК 535.376:546.26-162

Показано, что зависимость интенсивности катодолюминесценции от энергии возбуждающих электронов позволяет получать информацию о поверхностной рекомбинации, временах жизни неравновесных носителей и распределении люминесцентных центров по глубине кристалла. Метод применен для изучения ионно-имплантированного алмаза.

При изучении катодолюминесценции (КЛ) имплантированных кристаллов важно знать распределение по глубине плотности неравновесных носителей заряда $\Delta n(x)$ и ее зависимость от скорости поверхностной рекомбинации s , энергии возбуждающих электронов E , времени жизни τ и длины диффузии L неравновесных носителей. Это позволяет получать информацию о люминесценции слоев образца, находящихся на разной глубине, что особенно актуально в случае ионной имплантации.

Для возбуждения КЛ использовалась электронная пушка с энергией электронов от 2 до 10 кэВ и током электронного пучка ~ 5 мкА. Температура измерения 85 К. Фотоприемник — фотоумножитель ФЭУ-79. Имплантация природных алмазов ионами азота проводилась с энергией от 30 до 350 кэВ при комнатной температуре [1].

Согласно [2] уравнение, описывающее распределение неравновесных носителей в стационарном случае, имеет вид:

$$\frac{d^2 \Delta n(x)}{dx^2} - \frac{\Delta n(x)}{L^2} + \frac{G(x)}{D} = 0, \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии неравновесных носителей, $G(x)$ — плотность генерации неравновесных носителей. В случае возбужде-

ния электронным пучком $G(x)$ имеет вид [3]:

$$G(x) = \varepsilon_m \exp \left[- \left(\frac{x - x_m}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (2)$$

Однако для приближенного расчета будем аппроксимировать $G(x)$ следующей функцией:

$$G(x) = \begin{cases} \varepsilon_m^*, & 0 \leq x \leq x_m + 2\sigma \\ 0, & x > x_m + 2\sigma, \end{cases} \quad (3)$$

где ε_m^* пропорционально ε_m и зависит от E , $x_m + 2\sigma = R_m$ - максимальный пробег возбуждающих электронов. Тогда в области $0 \leq x \leq R_m$ уравнение (1) имеет решение:

$$\Delta n(x) = \Delta n_1(x) = \varepsilon_m^* \tau \left[1 - \frac{\operatorname{ch} \frac{x - R_m}{L}}{\operatorname{ch} \frac{R_m}{L} \left[1 + \frac{L}{s\tau} \operatorname{th} \frac{R_m}{L} \right]} \right], \quad (4)$$

а в области $x > R_m$:

$$\Delta n(x) = \Delta n_2(x) = C \exp(-x/L), \quad (5)$$

где постоянная C находится, из условия:

$$\Delta n_1(R_m) = \Delta n_2(R_m). \quad (6)$$

Изучение КЛ приповерхностных слоев алмаза, возбуждаемой электронами малой энергии, показало, что люминесценция практически исчезает при $E \lesssim 3$ кэВ. По-видимому, это связано с интенсивной поверхностной рекомбинацией. В силу этого будем считать, что

$$L/s\tau \ll 1. \quad (7)$$

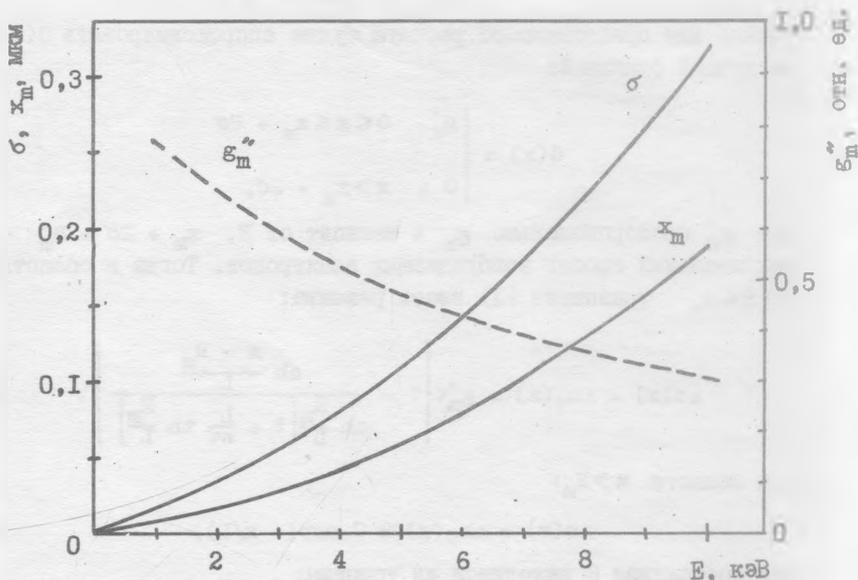
Среднюю плотность неравновесных носителей в возбуждаемом слое оценим величиной

$$\overline{\Delta n} = k \Delta n(x_m) = \varepsilon_m^* \tau \left[1 - \frac{\operatorname{ch} \frac{2\sigma}{L}}{\operatorname{ch} \frac{R_m}{L}} \right], \quad (8)$$

где k практически не зависит от E . Геометрия эксперимента была такова, что электронный пучок падал на поверхность образца под углом 45° , поэтому глубина проникновения возбуждающих электро-

нов будет $R_m/\sqrt{2}$. Будем считать, что максимальная глубина возбужденного слоя

$$R_m^* = R_m/\sqrt{2} + L. \quad (9)$$



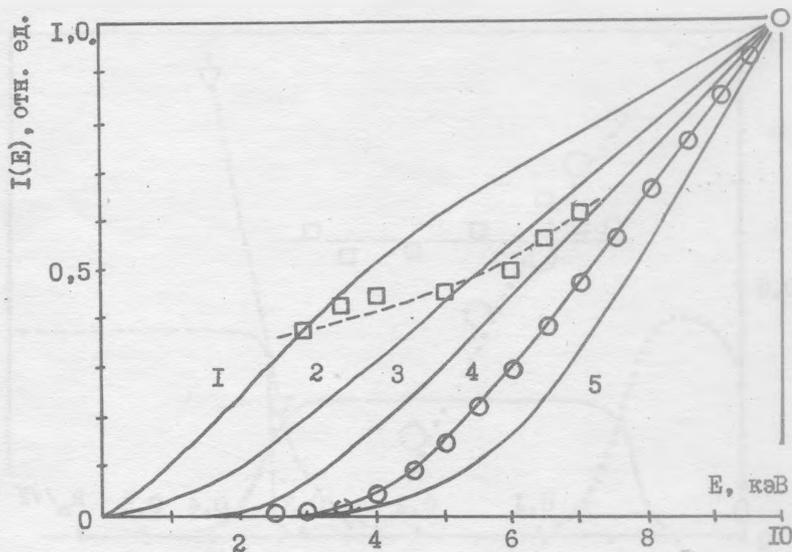
Р и с. 1. Зависимости σ , x_m и ϵ_m^* от энергии электронов согласно /3/

Отсюда полное число неравновесных носителей во всем возбуждаемом слое, которое и определит интенсивность люминесценции, с учетом (9) есть:

$$I(E) = \Delta n R_m^* = \epsilon_m^* \tau \left(1 - \frac{\text{ch} \frac{\sqrt{2}\sigma}{L}}{\text{ch} \frac{x_m + 2\sigma}{\sqrt{2}L}} \right) R_m^*. \quad (10)$$

Зависимость ϵ_m^* , x_m и σ от E представлена на рис. 1. На рис. 2 показаны зависимости $I(E)$, рассчитанные по (10) для различных величин L и экспериментальная зависимость интенсивности $I(E)$ А-полосы в природном алмазе типа Ia с концентрацией азота $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при постоянном токе электронного пучка. Видно, что наилучшее

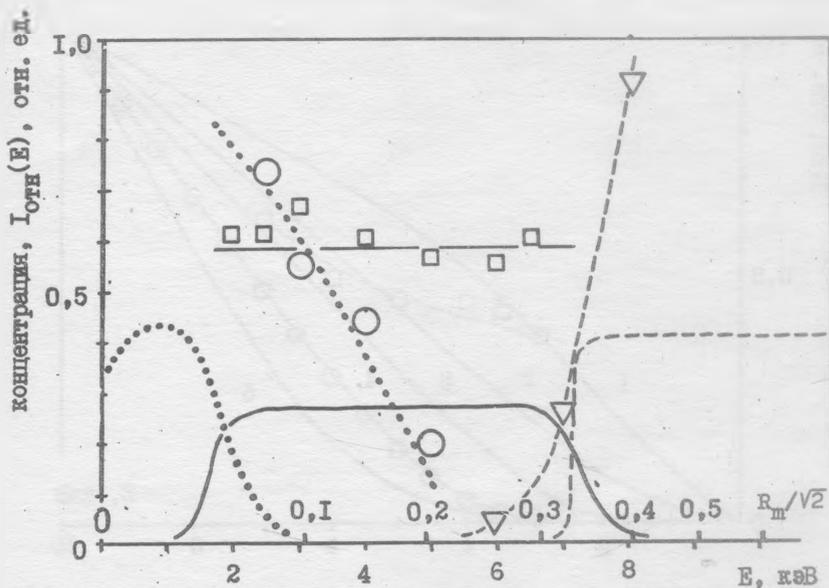
согласие достигается при $L \approx 0,3$ мкм, что при подвижности неравновесных носителей $1500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ соответствует временам жизни $\tau \sim 10^{-10}$ с. Из рис. 1 и 2 следует, что при большой скорости поверхностной рекомбинации люминесценция практически исчезает при $R_{\text{н}}/\sqrt{2} < 0,25L$.



Р и с. 2. Кривые - теоретические зависимости $I(E)$ для значений L : 30 \AA - (1), 300 \AA - (2), 1500 \AA - (3), 3000 \AA - (4), 7500 \AA - (5) и точки - экспериментальные зависимости $I(E)$ А-полосы в алмазе неимплантированном (о) и имплантированном (□) N^+ ионами

В имплантированных слоях L и τ значительно меньше. На рис. 2 показана экспериментальная зависимость $I(E)$ А-полосы в алмазе, имплантированном ионами N^+ равномерно по глубине от 500 \AA до 3500 \AA /I/ до концентрации 10^{20} см^{-3} и отожженном при $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Поскольку такое легирование достигалось имплантацией на нескольких ускоряющих напряжениях, то, естественно, нарушения решетки будут максимальны в приповерхностном слое. Это отражается ходом зависимости $I(E)$. Видно, что L , а следовательно, и τ уменьшается с приближением к поверхности.

Варьируя энергию возбуждающих электронов, можно изучать распределение люминесцентных центров по глубине и, следовательно, получать информацию о миграции дефектов и примеси, об их взаимодействии в разных областях имплантированного слоя. Однако при таких исследованиях желательно исключить влияние поверхностной



Р и с. 3. Теоретические распределения и экспериментальные зависимости $I_{OTN}(E)$ центров TR 12 и GR 1 (.....o), 389 нм (—□) и H3 (- - - -△)

рекомбинации и изменения времени жизни неравновесных носителей по глубине на интенсивность люминесценции оптических центров. Это можно достичь, измеряя интенсивность этих центров относительно некоторых других центров, которые достаточно равномерно распределены по кристаллу и не разрушаются в ходе имплантации и отжига. Наши измерения показали, что таким условиям удовлетворяют центры, обуславливающие люминесценцию А-полосы, которая присутствует в спектрах практически всех алмазов. На рис. 3 представлены теоретические распределения концентрации люминесцентных центров по

глубине и зависимость их относительной интенсивности люминесценции $I_{\text{отн}}(E)$ в кристалле с $L < 500 \text{ \AA}$

$$I_{\text{отн}}(E) = I(E)/I_A(E), \quad (\text{II})$$

где $I_A(E)$ - интенсивность А-полосы. Видно, что зависимость $I_{\text{отн}}(E)$ качественно отражает распределение центров люминесценции.

Автор благодарит В. С. Вавилова и А. А. Гишкуса за ценные замечания при обсуждении результатов, а также А. В. Спицына и В. А. Дравина за проведение ионной имплантации.

Поступила в редакцию
5 июля 1979 г.

Л и т е р а т у р а

1. J. F. Gibbons, W. S. Johnson, S. W. Mylroie, "Projected Range Statistics", Halstead Press, 1975.
2. П. С. Киреев, Физика полупроводников, М., "Высшая Школа", 1969 г.
3. В. В. Макаров, ФТП, 9, 1098 (1975).