

05;06;09;12

## Об особенностях модификации дефектной структуры в бинарных полупроводниках под действием микроволнового облучения

© И.Б. Ермолович, Г.В. Миленин, В.В. Миленин, Р.В. Конакова, Р.А. Редько

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины,  
03028 Киев, Украина  
e-mail: re\_rom@ukr.net

(Поступило в Редакцию 23 октября 2006 г.)

Проведен анализ некоторых возможных атермических процессов, вызванных СВЧ-обработкой ( $f = 2.45$  и  $84\text{ GHz}$ ), в полупроводниковых материалах, влияющих на их структурное состояние. Предложены модели изменения концентрации как точечных, так и протяженных дефектов при микроволновом облучении, которые качественно подтверждаются экспериментальными данными по исследованию структуры и люминесценции полупроводниковых материалов.

PACS: 81.05.-t

### Введение

Неожиданный эффект улучшения электрических характеристик диодов Шоттки, подвергнутых СВЧ-облучению (уменьшаются обратный и избыточный прямой токи, возрастает время жизни и увеличивается диффузионная длина неосновных носителей заряда) [1,2], послужил толчком для проведения исследований по влиянию микроволнового излучения на электрофизические параметры различных полупроводниковых материалов.

Можно было ожидать, что СВЧ-излучение при надлежащем выборе режимов облучения может использоваться в качестве специфического технологического воздействия для улучшения свойств полупроводниковых материалов: гомогенизации их структурных характеристик, устранения нежелательных дефектов.

В [3–5] такие исследования были выполнены на монокристаллах кремния. И хотя механизм наблюдаемых структурных превращений не установлен, было высказано предположение, что СВЧ-обработка приводит к структурной модификации Si вследствие суммарного действия двух факторов: изменения зарядового состояния дефектов и возникновения нестационарных полей упругих напряжений в кристалле, обусловленных мгновенным разогревом его дефектных областей. Однако, как показали проведенные исследования, стимулированные микроволновой обработкой эффекты не могут быть объяснены лишь на основании механизма быстрого термического отжига. По-видимому, в процессах структурной перестройки играют важную роль и атермические факторы, связанные со спецификой микроволновой обработки.

В представленной работе проведен анализ некоторых возможных атермических процессов, которые могут приводить к изменениям структурных характеристик полупроводников. Основное внимание было уделено особенностям модификации бинарных полупроводниковых соединений.

### Методика эксперимента

Для изучения особенностей взаимодействия микроволнового излучения с полупроводниками использовались:

- фотолюминесценция (ФЛ) в спектральном интервале  $0.6\text{--}2.0\text{ eV}$  при возбуждении светом с  $h\nu > 2\text{ eV}$ ;
- рентгеновская топография в геометрии Бормана с использованием  $K_\alpha$ -излучения Cu;
- рентгенодифракционный метод измерений радиусов кривизны исследуемых образцов.

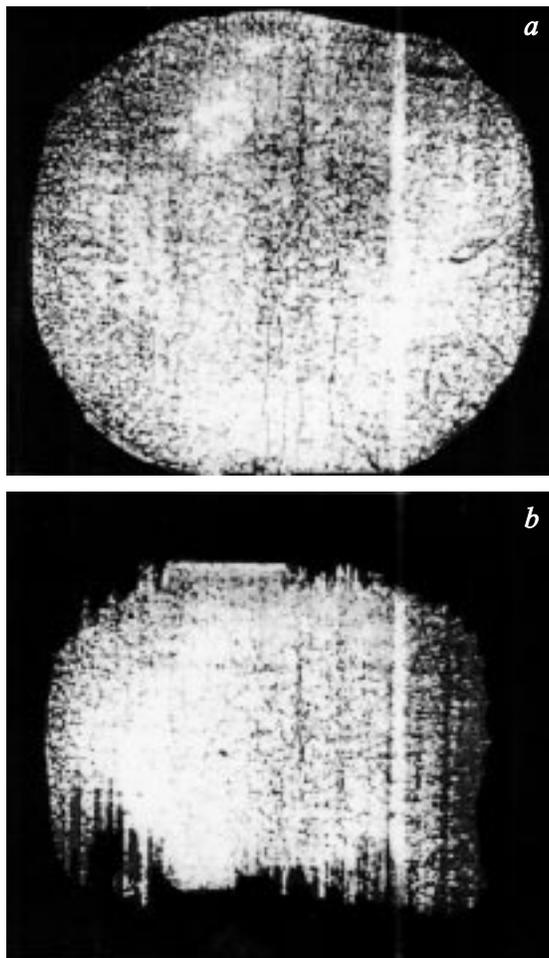
Все основные измерения были выполнены на пластинах  $n\text{-GaAs}$ , легированных Te и Sn. Концентрация свободных носителей в изучаемых образцах составляла  $(0.5\text{--}1) \cdot 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ .

Образцы подвергались облучению на частотах  $f = 2.45$  и  $84\text{ GHz}$  в условиях свободного пространства в направленном режиме. Мощность источников облучения составляла соответственно  $100\text{ W}$  и  $5\text{ kW}$ . Интенсивность облучения выбиралась из условия отсутствия существенного разогрева исследуемых объектов  $\leq 100\text{--}150^\circ\text{C}$ .

### Результаты и их обсуждение

Рентгенодифракические исследования исходных пластинок GaAs (рис. 1, *a*) показали, что помимо точечных дефектов и их комплексов с примесями в изучаемых материалах содержатся такие структурные нарушения, как дислокации и микровключения, неоднородно распределенные по пластинам. Все эти структурные нарушения могут быть причинами релаксационных потерь при микроволновом облучении полупроводника и при достаточной интенсивности СВЧ-излучения приводить к заметным структурным перестройкам в материалах (рис. 1, *b*).

Для объяснения полученных результатов можно воспользоваться следующим механизмом размножения дислокаций. Будем основываться на модели размножения,



**Рис. 1.** Рентгеновские топограммы образцов GaAs до (а) и после (б) микроволновой обработки ( $f = 2.45 \text{ GHz}$ ,  $P = 100 \text{ W}$ ).

предложенной Франком и Ридом [6–8]. В этой модели дислокация (источник Франка–Рида) закреплена с обоих концов какими-либо барьерами. При определенном сдвиговом напряжении  $\tau_k$  происходит генерация дислокационной петли и возникает новая дислокация. Этот цикл может повторяться многократно при

$$\tau_k = \frac{Gb}{L}, \quad (1)$$

где  $G$  — модуль сдвига;  $b$  — вектор Бюргерса;  $L$  — длина дислокации.

Генерация дислокационных петель может быть обусловлена не только действием не только механических, но и электростатических сил, если она имеет нескомпенсированный заряд. Действительно, образование дислокаций сопровождается появлением разорванных связей. Выражение для расстояния между разорванными связями  $C$  как функции угла  $\alpha$  между линией дислокации и ее вектором Бюргерса было выведено Ридом [8]

$$C = 0.866b \csc \alpha. \quad (2)$$

Электрон оборванной связи может покидать краевую дислокацию или захватываться ею, что приводит к изменению зарядового состояния дислокации.

Величину критического электрического поля, вызывающего генерацию дислокационных петель, можно вычислить из выражения

$$E_k = \frac{Gb^2c}{qL}, \quad (3)$$

где  $q$  — заряд электрона.

Если дислокационный сегмент находится под совместным действием механического и электрического полей, то соотношение для  $E_k$  имеет вид

$$E_k = \frac{Cb}{q} \left( \frac{Gb}{L} - \tau \right). \quad (4)$$

Проведем оценку величины  $E_k$ , необходимой для генерации дислокационных петель. Пусть в слое GaAs имеется краевой дислокационный сегмент с  $L = 10^6 b$ , причем вектор Бюргерса равен постоянной решетки  $d = 5.65 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ . Модуль сдвига  $G$  для направления  $\langle 100 \rangle$  при  $T = 300^\circ \text{ K}$  составляет  $60 \text{ GPa}$  [9].

Если для краевой дислокации  $C = 0.866 b$ , расчет по формуле (4) дает  $E_k = 1 \cdot 10^8 \text{ v/m}$ .

Если же в полупроводниковой структуре имеются механические напряжения  $\tau \approx 50 \text{ MPa}$ , действующие на дислокационный сегмент, тогда расчет по (4) приведет к следующей величине  $E_k = 1.7 \cdot 10^7 \text{ v/m}$ , которая может быть обеспечена лишь источниками электромагнитного излучения, созданными на базе сверхточных ускорителей релятивистских электронных пучков, т.е. в нашем случае лишь на предельных режимах гиратора ( $f = 84 \text{ GHz}$ ). Поэтому следует учитывать дополнительные факторы влияния на величину  $E_k$ , возникающие при микроволновой обработке.

Будем, как и ранее, рассматривать дислокацию в виде струны, находящейся под действием сосредоточенной в определенной точке  $c$  вынуждающей силы, изменяющейся по гармоническому закону

$$F = F_0 \sin \omega t.$$

Тогда для амплитуды вынужденных колебаний можно записать [10]:

$$V(x, t) = -\frac{2\omega F_0}{L\rho} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_n} \frac{\sin \frac{n\pi c}{L}}{\omega_n^2 - \omega^2} \sin \omega_n t \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} + \frac{2F_0}{L\rho} \sin \omega t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi c}{L}}{\omega_n^2 - \omega^2} \sin \frac{n\pi x}{L}, \quad (5)$$

где  $\omega$  — частота вынуждающей силы;  $F_0 = QE$  — амплитуда вынуждающей силы;  $\omega_n = an\pi/L$  — собственные частоты колебаний струны;  $a = \sqrt{T_0/\rho}$  — скорость распространения колебаний;  $T_0 = Gb^2$  — линейное натяжение струны [7];  $\rho$  — линейная плотность струны

( $\rho = zA/N_A d$ , где  $A$  — атомный вес;  $N_A$  — число Авогадро;  $d$  — постоянная решетки;  $z$  — число атомов в элементарной ячейке).

Первое слагаемое в (5) имеет вид свободных колебаний струны, второе имеет ту же частоту, что и возмущающая сила, обусловленная электрическим полем, и при приближении  $\omega$  к собственной частоте колебаний струны становится весьма большим, т.е. имеет место явление резонанса.

В том случае, когда вынуждающая сила приложена точно в середине струны ( $c = L/2$ ), компонента колебаний, обусловленная возмущающей силой, имеет вид

$$v(x, t) = \frac{2F_0}{L\rho} \sin \omega t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\omega_n^2 - \omega^2} \sin \frac{n\pi x}{L}. \quad (6)$$

Многokратная генерация дислокационных петель источником Франка–Рида происходит, когда амплитуда вынужденных колебаний превышает  $L/2$  [7].

При приближении  $\omega$  к одной из  $\omega_n$  условие генерации дислокаций имеет вид

$$E_k = \frac{L^2 \rho (\omega_n^2 - \omega^2)}{4Q \sin^2 n\pi/2}. \quad (7)$$

Выполним оценку  $E_k$  для различных значений частот электромагнитной волны.

Рассчитаем  $\omega_n$  для дислокационного сегмента с  $L = 10^3 b$ . Учитывая, что для GaAs  $A = 144.64 \cdot 10^{-3}$  kg,  $z = 8$ ,  $N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$  mol $^{-1}$ , соответственно находим  $\rho = 3.4 \cdot 10^{-15}$  kg/m,  $T_0 = 1.92 \cdot 10^{-8}$  N,  $a = 2.38 \cdot 10^3$  m/s. Тогда для  $\omega_n$  получаем  $\omega_n = 13.23n$  GHz. В дальнейших расчетах будем пользоваться самой низкой частотой —  $\omega_1 = 13.23$  GHz.

Оценим  $E_k$  для ситуаций, когда  $\Delta\omega = \omega_n - \omega$  соответственно составляют 1 GHz; 100, 10 MHz. В соответствии с (8) имеем следующий ряд значений  $E_k$ :  $4.0 \cdot 10^7$ ,  $4.0 \cdot 10^6$ ,  $4.0 \cdot 10^5$  v/m, т.е. с понижением частоты требуется меньшее значение критического поля для генерации дислокационных петель.

На поведение дислокационного сегмента в высокочастотном электрическом поле сильное влияние могут оказывать примесные атомы, декорирующие дислокации. Скапливаясь на дислокациях, они, с одной стороны, увеличивают  $\rho$  и тем самым приводят к снижению частоты  $\omega_n$ , а с другой — могут быть причиной появления свободных примесных атомов в кристалле вследствие их отрыва от дислокации при больших амплитудах колебаний.

Диэлектрические потери резонансного тока при микроволновой обработке могут играть важную роль и в перестройке локальных центров, обусловленных точечными дефектами и их комплексами.

Действительно, известно, что в монокристаллах соединений  $A^3B^5$  локальные центры могут осуществлять СВЧ-колебания [11]. Эти центры образованы ассоциациями примесных атомов с вакансией и характеризуются

сильной электрофононной связью. Их повышенная концентрация в кристаллах является следствием различных активных воздействий: радиационных, термических и др., а также процессов, протекающих на границах раздела контактов полупроводников с металлами и др. Электронные переходы на энергетические уровни таких центров могут происходить с участием фононных мод. Эти специфические особенности электронно-колебательных центров могут влиять на спектры поглощения и люминесценции кристаллов, содержащих эти центры, так как и в поглощении, и в люминесценции могут участвовать их метастабильные возбужденные состояния. Наконец, если частота изменений электрического поля совпадает с собственными частотами колебаний дефектов, увеличивается вероятность их миграции. Причем эти перемещения могут иметь место не только в пределах ближайшего окружения, но и на значительно больших расстояниях, сопровождаемые разрывом исходной химической связи. Очевидно, что переходы такого типа не требуют больших затрат энергии, а конечный результат СВЧ-воздействия на полупроводник определяется его составом и структурой (наличием неоднородных областей).

Анализ особенностей спектров резонансного поглощения с учетом взаимодействия осциллятора с окружением [12] приводит к тому, что фактическая частота, при которой имеет место резонансное поглощение, отличается от  $\omega_p$  без учета затухания (или поляризации окружающей среды)

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{N^2 q^2}{m}}, \quad (8)$$

где  $N$  и  $m$  — концентрация и масса дефекта.

Ниже остановимся на некоторых экспериментальных исследованиях, которые могут служить физическим обоснованием рассмотренных выше моделей. На рис. 1 были представлены рентгеновские топограммы двух пластин  $n$ -GaAs с концентрацией свободных носителей  $n = 3 \cdot 10^{16}$  cm $^{-3}$  и ориентацией поверхности (100). Как следует из приведенных результатов, микроволновая обработка в свободном пространстве ( $f = 2.45$  GHz,  $P \leq 100$  W) изменяет исходное структурное состояние полупроводника: способствует генерации дислокаций и уменьшает размеры скоплений точечных дефектов. Причем наблюдаемые структурные трансформации, по-видимому, носят осциллирующий характер, так как отражающая их изменения релаксация остаточных деформаций является также осциллирующей.

Эти результаты подтверждают результаты исследования релаксации остаточной деформации кремниевых пластин толщиной 350–400  $\mu$ m, представленные в [5]. Было обнаружено, что релаксация остаточных деформаций существенно отличается от обычного термического отжига и носит сложный осциллирующий характер с явно выраженными атермическими участками (энергия активации  $\leq 0.065$  eV). Оба способа отжига приводят

Изменение радиуса кривизны структуры  $\text{TiB}_x\text{-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$  в зависимости от времени СВЧ-облучения

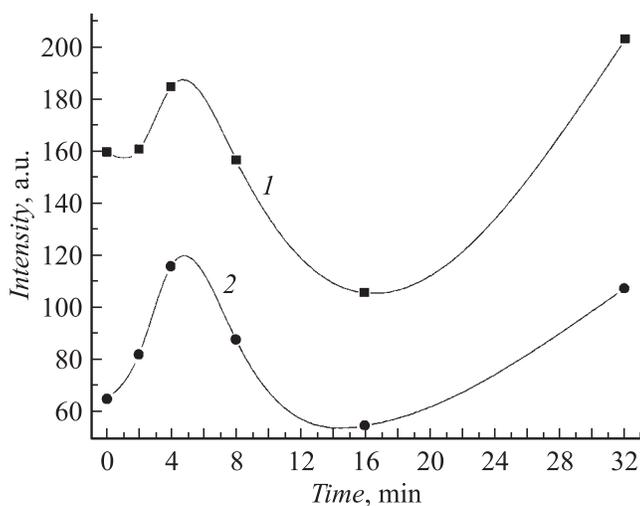
$t, \text{s}$	0	0.5	1.5	3.5	6.0	9.0	13.0	18.0
$R, \text{m}$	7.5	6.0	5.4	12.2	15.1	11.1	11.7	6.7

к одинаковым результатам лишь при достаточно длительных микроволновых воздействиях, обеспечивающих разогрев полупроводника до температур  $\geq 400^\circ\text{C}$ .

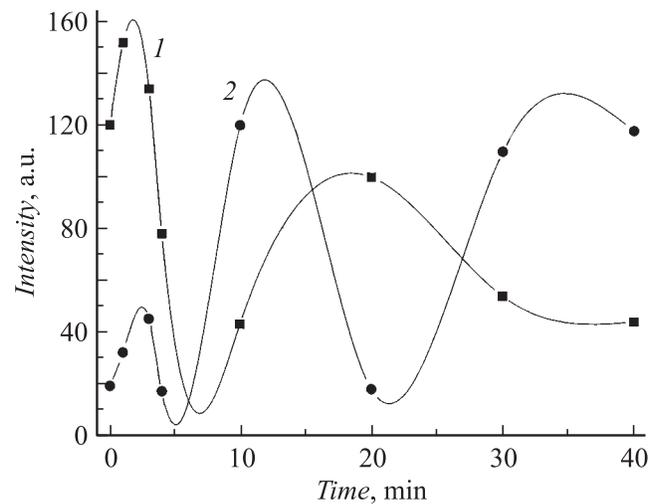
В [13] было обнаружено, что микроволновое облучение интенсивностью  $1.5 \text{ W/cm}^2$  в течение  $\leq 10 \text{ s}$  (что явно недостаточно для разогрева структуры, сформированной квазиаморфным слоем  $\text{TiB}_x$  с GaAs) приводит к возникновению периодического контраста в виде параллельных полос вдоль направлений  $\langle 111 \rangle$ . Интересно также отметить, что радиус кривизны этих структур носит осциллирующий характер в зависимости от времени облучения (см. таблицу).

Для установления доминирующих механизмов изменений в дефектной подсистеме полупроводника, вызванных СВЧ-обработкой, и проверки предложенных моделей требуются детальные данные о характере и типе дефектов, в том числе о параметрах их кластеров и скоплений. Последнее само по себе представляет достаточно сложную проблему, так как требует комплексного экспериментального подхода для ее решения. Трудности, стоящие на этом пути, не преодолены вплоть до настоящего времени.

Рассмотренные атермические механизмы, обуславливающие структурные перестройки, не описывают всего многообразия процессов, протекающих в неравновес-



**Рис. 2.** Изменение интенсивности полос ФЛ образцов с вицинальной поверхностью (отклонение от (100) составляет  $a'$ ) от длительности микроволнового облучения ( $f = 2.45 \text{ GHz}$ ,  $P = 100 \text{ W}$ ); 1 — 1.18, 2 — 1.1 eV.



**Рис. 3.** Изменение интенсивности полос ФЛ образцов GaAs:Sn (100) от длительности СВЧ-облучения ( $f = 84 \text{ GHz}$ ,  $P = 5 \text{ kW}$ ); 1 — 1.01, 2 — 1.28 eV.

ной дефектной подсистеме монокристаллического полупроводника при микроволновой обработке. Одним из таких является обнаруженный нами осциллирующий характер изменения интенсивности полос ФЛ от длительности облучения. Пример такой зависимости приведен на рис. 2. В этом случае наблюдалось симбатное изменение интенсивности полос ФЛ от длительности облучения. Интерпретация полученных результатов довольно проста. В [14] было показано, что микроволновое излучение вызывает синергетическую реакцию образцов на такое воздействие, в результате чего ранее однородно распределенные по объему фоновые примеси (возможно, и дефекты) после обработки приобретают полосчатое распределение с фиксированным периодом идентичности. Эти примесные центры или их комплексы могут быть центрами безызлучательной рекомбинации, что и обуславливает колебательный характер изменений интенсивности ФЛ.

Однако реальная ситуация гораздо сложнее. И хотя пространственно-временной осциллирующий характер интенсивности ФЛ имеет место, поведение различных полос чаще всего несимбатно (рис. 3).

Возможной причиной наблюдаемых эффектов может быть то обстоятельство, что в случае возникновения пространственно регулярной диссипативной структуры в ансамблях нарушений кристаллической решетки, наряду с твердотельной матрицей (атомной регулярности), появляется дополнительный канал перераспределения энергии электромагнитного воздействия, связанный с периодической диссипативной структурой дефектов в кристалле, обеспечивающей разнообразие процессов самоорганизации неравновесных дефектов в твердых телах.

## Список литературы

- [1] *Беляев А.Е., Беляев А.А., Венгер Е.Ф.* и др. // Мат. 6-й Междунар. Крымской микроволновой конф. „Крымико-96“, Севастополь, Крым, Украина, 1996. С. 71–89.
- [2] *Бреза Ю., Миленин В.В., Конакова Р.В.* и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1997. Т. 10. С. 83–85.
- [3] *Абдурахимов Д.Е., Вахидов Ф.Ш., Верещагин В.Л.* и др. // Микроэлектроника. 1991. Т. 20. Вып. 1. С. 22–25.
- [4] *Абдурахимов Д.Е., Бочикашвили П.Н., Верещагин В.Л.* и др. // Микроэлектроника. 1992. Т. 21. Вып. 1. С. 82–89.
- [5] *Паиков В.И., Перевоицков В.А., Скупов В.Д.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 20. Вып. 8. С. 14–17.
- [6] *Полухин П.И., Горелик Г.С., Воронцов В.К.* Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982. 584 с.
- [7] *Фридель Ж.* Дислокации. М.: Мир, 1967. 644 с.
- [8] *Родерс Р.П.* Несовершенства и активные центры в полупроводниках. М.: Металлургия, 1968. 371 с.
- [9] *Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фиттахов Э.А.* Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
- [10] *Смирнов В.И.* Курс высшей математики. Т. II. М.: Наука, 1974. 656 с.
- [11] *Вдовенков В.А., Прокофьева С.П.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 9. С. 67–72.
- [12] *Богородицкий Н.П., Волокобинский Ю.Т., Воробьев А.Н., Тареев Б.М.* Теория диэлектриков. М.: Энергия, 1965. 365 с.
- [13] *Konakova R.V., Milenin V.V., Voitsikhovskiy D.I., Kamalov A.B., Kolyadina E.Yu., Lytvyn P.M., Lytvyn O.S., Matveeva L.A., Prokopenko I.V.* // Semiconductor Physics. Quantum Electronics. Optoelectronics, 2001. Vol. 4. N 4. P. 298–300.
- [14] *Быков Ю.В.* Геттерирование примесей и дефектов в кремнии при обработке в СВЧ-поле. М., 1991. 14 с. Деп. в ВИНТИ 20.05.91 № 2332-B91.