

ВЛИЯНИЕ СВЧ-ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ

Р.И.Байцар, Г.Н.Бортник, С.С.Варшава, И.В.Курило.

Государственный университет «Львовская политехника», 290013, Львов-13, ул.С.Бандеры, 12, Украина, тел.(0322) 72-16-32, факс (0322) 74-43-00, e-mail: iostrov@polynet.lviv.ua

Исследовано влияние СВЧ-облучения (1...20 ГГц) на электросопротивление нитевидных кристаллов полупроводников Si, Si-Ge, GaAs, GaAsP. Проанализированы зависимости изменения сопротивления образцов, находящихся в СВЧ-поле, от падающей мощности и от частоты излучения. При послепороговых дозах облучения установлено уменьшение микротвердости GaAs, эффективной поверхностной энергии и напряжения хрупкого разрушения в пределах до 40%. Показано, что нитевидные полупроводниковые кристаллы могут эффективно использоваться в СВЧ-технике.

1. Влияние СВЧ-излучения на электрические параметры нитевидных кристаллов Si и твердых растворов Si-Ge.

Известно, что СВЧ-облучение является эффективным методом модификации свойств полупроводниковых материалов и структур [1]. Механизмы такого воздействия до конца не изучены. Известно, что они являются структурно чувствительными, поэтому структурно совершенные полупроводниковые кристаллы интересны для исследования с данной точки зрения.

Полупроводниковые нитевидные кристаллы (НК) обладают рядом свойств, делающих их удобными объектами для исследования в СВЧ полях:

а) максимальные геометрические размеры кристаллов не превышают 0,3х0,3х5 мм³. Объекты таких размеров (намного меньше длины волны СВЧ-излучения) практически не искажают поля в волноводном тракте. Кроме того, поле одинаково во всем объеме кристалла;

б) сравнительно высокое удельное сопротивление ($\rho > 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Отсутствует скин-эффект, СВЧ-поле пронизывает весь кристалл.

Исследования проводились на установке, в которой источником СВЧ-поля служит генератор сигналов высокочастотный типа Г4-127, позволяющий плавно изменять частоту излучения от 11,95 ГГц до 16,5 ГГц с максимальной выходной мощностью 8 мВт. Мощность излучения в прямом волноводном тракте регулируется с помощью аттенюатора, установленного на выходе генератора. На конце волноводного тракта размещена измерительная термисторная головка типа МБ-28А, представляющая собой оконечную нагрузку, которая в комплекте с термисторным мостом типа М4-3 обеспечивает измерение мощности СВЧ-излучения в волноводном тракте. В волноводе имеется малое отверстие, в которое параллельно узкой стенке вводится зонд с исследуемым НК. Исследуемый кристалл подсоединен к измерительному прибору, обеспечивающему непрерывное измерение сопротивления кристалла и э.д.с., возникающей на контактах к кристаллу при воздействии на него СВЧ-поля. В качестве измерительного прибора использовали вольтметр универсальный типа В7-16. Методика исследований аналогична [2,3].

На рис.1 приведена зависимость изменения сопротивления ΔR НК твердого раствора Si-Ge от мощности СВЧ-излучения на различных фикси-

рованных частотах. Зависимости аппроксимируются прямыми линиями. Между полученными зависимостями ΔR от частоты и величины э.д.с., возникшей на контактах НК при уровне мощности 5 мВт, от частоты существует четкая корреляция. Наиболее сильная зависимость изменения сопротивления от мощности наблюдается при тех частотах, на которых находятся пики. Наиболее выраженные пики изменения R/R_{max} ($\epsilon/\epsilon_{\text{max}}$) соответствуют частотам 15,5 – 16,5 ГГц. Аналогичные зависимости наблюдались на НК твердого раствора Si-Ge с другим содержанием компонентов, однако пики были смещены. Четкой зависимости между положением пиков и составом кристаллов пока не выявлено. Исследование кристаллов под более мощным излучением (до 20 мВт) показало на низких уровнях мощности аналогичную зависимость, а на более высоких приводило к локальным разогревам кристаллов (до температуры $\approx 800^\circ\text{C}$). Частотную зависимость СВЧ-мощности, поглощаемой короткими $n^+ - p - p^+$ структурами, связывают с наличием волн пространственного заряда [4].

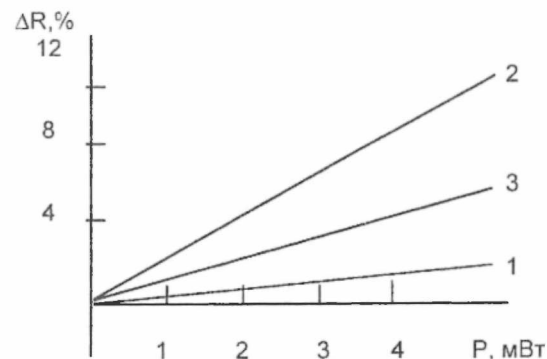


Рис.1. Зависимость изменения сопротивления ΔR от мощности СВЧ-поля для НК твердого раствора Si-Ge при частоте излучения: 1- 14,8 ГГц, 2- 16,3 ГГц, 3- 16,5 ГГц.

Как уже отмечалось, небольшие размеры образцов практически не искажают поле в волноводе - коэффициент стоячей волны по напряжению в самых экстремальных условиях не превышал значения 1,2, что соответствует менее 1% мощности отраженного излучения. Поглощаемую кристаллом мощность (размеры кристалла максимальные, проводимость — 20 Ом⁻¹·м⁻¹) для час-

тоты в середине диапазона рассчитываем по формуле [3]:

$$P_{\text{полг}} = \frac{1510 S \sigma}{\sqrt{4a^2 - \lambda^2}} P \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения образца; σ – проводимость, a – параметр волновода; λ – длина волны; P – мощность падающего излучения. Отсюда, $P_{\text{полг}} = 9,1 \cdot 10^{-4} P$. Отсюда можно определить напряженность электрического поля в кристалле

$$E = \sqrt{\frac{2 P_{\text{полг}}}{\sigma \cdot V}} \quad (2)$$

где V – объем кристалла.

Для максимальной выходной мощности (8 мВт) напряженность в кристалле достигает 400 В/м, что вполне достаточно для генерации горячих носителей. Наличие горячих носителей подтверждается также S-образной формой ВАХ кристаллов, типичной для процессов ударной ионизации.

Определенный интерес с точки зрения чувствительности к СВЧ-мощности вызывают НК Si, обладающие не только высокими значениями температурного коэффициента сопротивления, но и высокими значениями коэффициентов термо-э.д.с. в диапазоне 20...200 °С.

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

- кристаллы неоднородны как по длине, так и по толщине, что подтверждается их неравномерным нагревом в сильных полях, а также фактом наличия горячих носителей, которые могут генерироваться лишь в областях с высоким сопротивлением;
- в возникновении э.д.с. определенную роль играют, по-видимому, также контакты и приконтактные области;
- исследуемые кристаллы могут быть пригодными для создания приборов для СВЧ-техники.

II. Влияние СВЧ-излучения на электрические параметры НК GaAs, GaAsP

Изучалось влияние СВЧ-излучения на проводимость нелегированных и легированных НК GaAs, GaAsP. Исследования проводились при комнатной температуре, величина мощности выходного излучения изменялась в пределах 0...20 Вт. НК с токовыводами помещались в резонатор СВЧ генератора, частота излучения которого 1 ГГц. Измерения сопротивления проводились с помощью цифрового вольтметра В7-16А.

В зависимостях изменения относительного сопротивления исследуемых полупроводниковых НК от мощности СВЧ-излучения наблюдаются две области: первая – резкого возрастания относительного сопротивления НК для диапазона мощностей СВЧ-излучения 0...8 Вт, вторая – тенденция к насыщению для диапазона мощностей 8...20 Вт.

В таблице 1 приведены коэффициенты чувствительности к СВЧ-излучению при $P = 8$ Вт

различных полупроводниковых НК. Коэффициент чувствительности определяется по формуле:

$$K = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot P} \quad (3)$$

Где $\Delta R/R_0$ – относительное изменение сопротивления кристаллов, P – мощность излучения.

Таблица 1
Значение коэффициентов чувствительности K для полупроводниковых материалов

Материал	$K, \%/Вт$
GaPAs< S >	9,9
GaAs< Fe >	9,0
GaAs< S >	5,0
GaAs< Cd >	2,5
GaAs	3,0
GaAsP< Cu >	0,8

Наиболее чувствительными к СВЧ-излучению являются НК GaAsP, особенно при малых значениях мощности излучения. Так при мощности 2 Вт коэффициент чувствительности этого материала составляет 32,5 %/Вт, что в 2 раза больше, чем, например, в НК Te. Для НК GaAs<Cd> $\Delta R/R_0$ имеет положительное значение в отличие от других образцов и для мощностей излучения 0...20 Вт $\Delta R/R_0$ увеличивается в пределах 10...42 %.

Исследовалось также влияние температуры среды на чувствительность НК к СВЧ-излучению. Замечено, что для НК GaAs<S> при мощности излучения 10 Вт, $K = 4,97 \%/Вт$ при комнатной температуре, а при понижении температуры K уменьшается до 2,6 %/Вт.

Проведенные эксперименты дали возможность разработать измеритель СВЧ-излучения в диапазоне малых мощностей. В качестве чувствительных элементов использовались GaPAs кристаллы, легированные серой p-типа, выращенные из газовой фазы. Размеры НК оптимизированы из соотношения $10^3 < S/l < 4 \cdot 10^{-3}$, где S – площадь поперечного сечения, l – длина НК (см). Это соотношение установлено на основе экспериментально полученной зависимости коэффициента чувствительности K от геометрического параметра S/l . При мощности излучения $P = 7$ Вт чувствительность измерителя мощности

СВЧ-излучения из НК $GaP_{0.45}As_{0.55}<S>$ составляет 40 %/Вт, что в 4 раза больше, чем полупроводникового измерителя мощности типа ТШ-2 [5].

В основе работы такого измерителя СВЧ-мощности лежит как болометрический эффект, связанный с тепловым разогревом, так и эффекты связанные с наличием микро- и макронеоднородностей в НК.

III. Исследование некоторых прочностных и хрупких свойств кристаллов GaAs

Обнаруженное уменьшение микротвердости кристаллов GaAs в поле СВЧ напоминает отрицательный фотопластический эффект, на-

блюдаемый в некоторых кристаллах с решеткой сфалерита [6].

Поскольку кристаллы GaAs довольно хрупкие, интересно было исследовать влияние СВЧ-излучения на хрупкое разрушение. В таблице 2 представлены данные по изменению эффективной поверхностной энергии $\gamma_{\text{эф}}$ для различных кристаллографических плоскостей, а также напряжения хрупкого разрушения $\sigma_{\text{хр.р.}}$ до и после облучения в поле СВЧ.

Таблица 2
Влияние СВЧ-облучения на прочностные свойства кристаллов GaAs

n, p см ⁻³	t ч	$L_{\text{тр}}$ 10 ⁻⁴ см	H_v ГПа	$\gamma_{\text{эф}}$ Дж/м ² (110)	$\gamma_{\text{эф}}$ Дж/м ² (100)	$\gamma_{\text{эф}}$ Дж/м ² (111)	$\sigma_{\text{хр.р.}}$ МПа
p1	0	9,36	7,32	2,34	3,27	1,92	142
	2	11,9	7,15	2,25	3,15	1,86	123
p2	0	11,7	7,32	1,5	2,1	1,24	104
	2	14,2	7,06	1,27	1,77	1,04	72
N	0	11,9	7,11	2,25	3,15	1,9	123
	2	24,0	6,81	1,71	2,4	1,41	106

где n, p – концентрации носителей заряда:
 $p1=4,5 \cdot 10^{18}$, $p2=7,8 \cdot 10^{19}$, $n=4 \cdot 10^{15}$, t – время облучения, $L_{\text{тр}}$ – длина трещины, H_v – микротвердость кристалла.

Видно, что более сильная зависимость $\gamma_{\text{эф}}$ и $\sigma_{\text{хр.р.}}$ от дозы СВЧ-облучения имеет место для кристаллов GaAs n-типа проводимости. Это

может быть связано с уменьшением концентрации мелких доноров в приповерхностном слое или же в объеме полупроводника вследствие их ухода на стоки под действием волны излучения, как это наблюдали для кристаллов CdTe n-типа проводимости. Этими стоками могут быть дислокации и другие дефекты структуры.

Полученные результаты можно использовать для управления механическими свойствами материалов, в частности при химико-механической обработке, изготовлении образцов и элементов приборов.

Список литературы

1. Миленин В.В. // Взаимод. излучений с тв. телом. Тез. докл. 2-й междунар. конф.- Мн., 1997-С.118.
2. Билько М.И., Томашевский А.К. // Измерение мощности на СВЧ. - М: Радио и связь, – 1986. – 168 с.
3. Полупроводниковые преобразователи. – ч.2. /Под редакц. Пожелы Ю.– Вильнюс: МОКСЛАС, - 1980. – С. 9- 73.
4. Баранов А.В., Барановский С.Н., Позгорельский А.М. // ФТП. – т.21. – вып.8. – 1987. -С.638-640.
5. Шефтель И.Т. // Терморезисторы. – М.: Наука., - 1983. – С.387 – 390.
6. Кучма В.И., Курило И.В., Варшава С.С. // Исследование некоторых прочностных свойств GaAs и их изменение под влиянием внешних воздействий. Рук. Деп. в УкрНИИ НТИ 07.01.1987.- № 259.- Ук.87. – 6с.

INFLUENCE OF MICROWAVE – IRRADIATION ON SEMICONDUCTOR CRYSTALS STRUCTURE AND PROPERTIES

R.I.Baitsar, H.M.Bortnik, S.S.Varshava, I.V.Kurylo.
 State University "Lviv Polytechnic", 12 Bandera Str., Lviv, 290013, Ukraine, tel. (0322) 72-16-32,
 fax (0322) 74-43-00, e-mail: iostrov@polynet.lviv.ua

The influence of microwave - irradiation (1 ... 20 GHz) on electroresistance of Si, Si-Ge, GaAs, GaAsP semiconductor whiskers was investigated. The dependences of resistance change of samples setting in microwave - field on power and frequency of radiation were analysed. At irradiation doses above threshold dose the decrease of GaAs crystals microhardness, effective superficial energy and fragile destruction voltage in limits up to 40 % were established. It is shown, that semiconductor whiskers can effectively be used as sensors of microwave – radiation power in the microwave technique. Their advantage is the increased sensitivity to small values of radiation power. The dependence of sensitivity coefficient to radiation power on geometrical parameter S/l , where the S -area of cross section, l - length of a sample, and also frequency dependence of electrical parameters testify to heterogeneity whiskers.

