

$$\tau = \tau_M = \epsilon_0 \epsilon \rho_V \quad (1)$$

определяется диэлектрической проницаемостью ϵ и объемным удельным сопротивлением ρ_V диэлектрика.

Подстановка в (1) табличных значений ϵ и ρ [6] дает значение τ_M ниже тех, которые мы наблюдаем на опыте (см. таблицу). Только в ПТФЭ рассчитанная величина τ_M сравнима с τ_1 .

В [5] показано, что измерение ρ в условиях, сходных с теми, которые имеют место в электретах (большое время выдержки под напряжением), приводит к таким величинам сопротивления, которые на 1—2 порядка больше, чем при стандартных измерениях с малой выдержкой образцов под напряжением. Кроме этого известно, что облучение диэлектриков высокоэнергетическими ионами может увеличивать их диэлектрическую проницаемость. Учет этих факторов будет приближать расчетное время релаксации к экспериментальному. Более подробное изучение механизмов релаксации заряда требует дополнительных исследований электрических свойств ионно-имплантированных диэлектриков.

Однако и на основании уже проведенных нами исследований электретных свойств полимерных диэлектриков можно утверждать, что наилучшим материалом как по величине накапливаемого заряда, так и времени его жизни является политетрафторэтилен. Заряд на половинном уровне от начальной величины σ_0 в нем может сохраняться около 10 лет.

Автор выражает признательность Фонду фундаментальных исследований Республики Беларусь за финансовую поддержку работы.

1. Заявка № 55—129897 Япония; Опубл. 10.01.80, Бюл. № 7—23.
2. О л ь ш о в ы М., Д а н и л ь к е в и ч М. И., П о ч т е н н ы й А. Е. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук. 1982. № 2. С. 97.
3. Б о е в С. Г., У ш а к о в В. Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики. М., 1991.
4. К у м а х о в М. А., К о м а р о в Ф. Ф. Энергетические потери и пробеги ионов в твердых телах. Мн., 1979.
5. Л у щ е й к и н Г. А. Полимерные электреты. М., 1976.
6. Физические величины: Справ. /Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М., 1991.

Поступила в редакцию 11.04.94.

УДК 546.273.171

Г. А. ГОВОР, В. М. ДОБРЯНСКИЙ, А. А. ЛЕУСЕНКО,
Н. Ф. ЛУГАКОВ, А. С. РУБАНОВ

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА МАРКИ «СВЕТЛАНІТ»

Electrophysical properties of cubic nitride of boron (CBN) mk. «Svetlanit», depending upon the conditions of isothermic annealing in different mediums have been studied. Characteristic conditions which conform to the maximum parameters have been determined.

Метод прямого (без специального введения катализаторов-растворителей) превращения графитоподобного нитрида бора в кубическую модификацию (КНБ) при давлении 4—9 ГПа и температуре 2000—3000 К [1] открыл возможность получения высокочистых поликристаллов КНБ [2], которым присвоен товарный знак «Светланіт». Эти поликристаллы обладают повышенными физико-механическими и режущими свойствами [3], что позволяет расширить их применение не только в металлообрабатывающей, но и в электронной промышленности.

Отжиг поликристаллических образцов на основе высокоплотных модификаций нитрида бора приводит к изменению структуры образцов, влияет на их механические и электрофизические свойства [4].

Воздействие изотермического отжига на изменение механических, электрофизических и тепловых свойств поликристаллического КНБ обусловлено тем, что указанный материал, синтезируемый при высоких давлениях и температурах, обладает высокой степенью дефектности: микровключения бора, вакансии по бору и азоту, собственные и примес-

ные междуузельные атомы, дислокации, микропоры, границы зерен [5]. Кроме того, влияние высокотемпературного изотермического отжига на свойства КНБ марки «Светланит» связано с наличием и изменением микронапряжений, возникающих вследствие микроскопически неоднородного распределения фаз (вюрцитной и сфалеритной) из-за градиентного распределения температуры и давления при фазовом превращении гексагонального нитрида бора в кубический нитрид бора. Величина микронапряжений в материале связана со значительным изменением объема образцов при этом фазовом переходе [6]. Следует отметить, что указанные в различных работах температуры, соответствующие началу фазового перехода гексагональный — кубический нитрид бора, находятся в широком температурном интервале и в большой мере определяются структурным состоянием и наличием примесей в исходном нитриде бора [7]. В работе приведены результаты исследований влияния высокотемпературного отжига в различных средах на электрофизические свойства высокоплотного материала на основе КНБ марки «Светланит».

Материал и методика

Изотермический отжиг проводили в воздушной и инертной атмосферах, а также в вакууме ($P = 10^{-2}$ Па) при температурах 400, 600, 800, 1000, 1400 °С в течение 6 ч с последующим снижением температуры со средней скоростью 5 °С/мин.

Для проведения указанных исследований выбирались серии образцов (по 3 в каждой), обладающих близкими значениями диэлектрической проницаемости и удельного электросопротивления. Величину диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь (до и после отжига) определяли на частоте $f = 1$ кГц с помощью цифрового измерителя емкости В7-8, величину удельного электросопротивления — цифровым электрометром Keithley 616.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1—3 представлены усредненные значения диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и удельного электросопротивления, измеренные при комнатной температуре вдоль направлений «а» и «с» образцов кубического нитрида бора марки «Светланит», отожженных изотермически при различных температурах в воздушной атмосфере (табл. 1), инертной атмосфере (табл. 2) и в вакууме (табл. 3). Направление «а» совпадает с направлением приложения давления прессовки, «с» перпендикулярно направлению «а».

Анализ экспериментальных данных, приведенных в таблицах, показывает, что с повышением температуры отжига наблюдается увеличение значений удельного электросопротивления и диэлектрической проницаемости и понижение значений тангенса угла диэлектрических потерь.

Т а б л и ц а 1

Изменение физических свойств образцов кубического нитрида бора марки «Светланит» в результате изотермического отжига в воздушной атмосфере

Температура отжига, (°С)	Ф и з и ч е с к и е п а р а м е т р ы					
	ϵ_a	ϵ_c	$\text{tg}\delta_a$, (%)	$\text{tg}\delta_c$, (%)	$\rho_a \cdot 10^{14}$, (Ом·мм)	$\rho_c \cdot 10^{15}$, (Ом·мм)
—	7.0	6.7	0.72	0.58	1.5	2.3
400	4.1	6.7	0.64	0.48	1.8	2.6
600	7.2	6.8	0.54	0.32	2.6	3.8
800	7.4	7.1	0.47	0.19	3.9	5.3
1000	7.3	6.8	0.52	0.27	3.2	5.1
1200	6.5	6.4	0.84	0.46	1.9	3.2
1400	5.8	6.1	1.24	0.81	0.2	1.1

Соответствующие максимальные и минимальные значения исследованных параметров наблюдаются в образцах, отожженных при температурах 800—1000 °С, причем температура отжига, соответствующая экстремальным значениям этих параметров, практически не зависит от среды, в

которой проводился отжиг. При дальнейшем повышении температуры отжига наблюдается противоположная тенденция.

Увеличение значений удельного электросопротивления и диэлектрической проницаемости и уменьшение значений тангенса угла диэлектрических потерь с ростом температуры может быть связано, на наш взгляд, с процессом аннигиляции простейших дефектов вследствие уменьшения числа микропор и микротрещин, вакансий и междоузельных атомов, дислокаций, что приводит к росту структурного совершенства и релаксации напряженного состояния образцов, возникающего в процессе их пластической деформации при синтезе.

Т а б л и ц а 2

Изменение физических свойств образцов кубического нитрида бора марки «Светланит» в результате изотермического отжига в инертной атмосфере

Температура отжига, (°C)	Ф и з и ч е с к и е п а р а м е т р ы					
	ϵ_a	ϵ_c	$\text{tg}\delta_a$, (%)	$\text{tg}\delta_c$, (%)	$\rho_a \cdot 10^{14}$, (Ом·мм)	$\rho_c \cdot 10^{15}$, (Ом·мм)
—	7.0	6.7	0.72	0.58	1.5	2.3
400	4.1	6.9	0.56	0.43	1.9	3.4
600	7.3	7.2	0.39	0.25	2.9	4.8
800	7.6	7.4	0.32	0.15	4.7	6.5
1000	7.4	7.1	0.41	0.29	3.2	4.8
1200	7.0	6.7	0.76	0.47	1.4	2.8
1400	6.6	6.5	1.05	0.74	0.7	1.4

Т а б л и ц а 3

Изменение физических свойств образцов кубического нитрида бора марки «Светланит» в результате изотермического отжига в вакууме ($p = 10^{-2}$ Па)

Температура отжига, (°C)	Ф и з и ч е с к и е п а р а м е т р ы					
	ϵ_a	ϵ_c	$\text{tg}\delta_a$, (%)	$\text{tg}\delta_c$, (%)	$\rho_a \cdot 10^{14}$, (Ом·мм)	$\rho_c \cdot 10^{15}$, (Ом·мм)
—	7.0	6.7	0.72	0.58	1.5	2.3
400	7.0	6.8	0.68	0.48	1.9	2.6
600	7.4	7.1	0.34	0.26	3.4	4.7
800	7.7	7.5	0.28	0.09	5.2	7.1
1000	7.6	7.5	0.31	0.15	5.0	7.0
1200	7.3	7.1	0.56	0.28	3.7	4.2
1400	6.8	6.7	0.83	0.48	1.1	2.8

Уменьшение значений удельного электросопротивления и диэлектрической проницаемости и увеличение значений тангенса угла диэлектрических потерь при температурах отжига выше 1000 °C может быть связано с частичным обратным фазовым переходом кубического нитрида бора в гексагональный, поскольку графитоподобная фаза образуется уже при температуре 1000 °C, а более высокая температура приводит к интенсификации этого процесса. В результате возникают дополнительные микронапряжения вследствие значительного увеличения объема образцов [2, с. 189]. Полученные результаты по термостойкости КНБ марки «Светланит» полностью удовлетворяют исследованиям термогравиметрии и дифференциального термического анализа данного материала [8].

В ы в о д ы

Результаты исследования изотермического отжига КНБ марки «Светланит» показали, что с повышением температуры отжига существует увеличение значений удельного электросопротивления и диэлектрической проницаемости и понижение значений тангенса угла диэлектрических потерь. Соответствующие максимальные и минимальные значения исследованных параметров наблюдаются в образцах, отожженных при

температурах 800—1000 °С, причем температура отжига не зависит от среды, в которой проводился отжиг. При дальнейшем повышении температуры отжига установлена противоположная тенденция в изменении исследованных физических величин.

1. А. с. № 286743 СССР. Способ получения кубического нитрида бора. Сирота Н. Н., Мазуренко А. М.

2. Мазуренко А. М., Добрянский В. М., Ракицкий Э. Б. и др. // Техника и технологии высоких давлений. 1990. С. 109.

3. Мазуренко А. М., Ничипор В. В. // Новые инструментальные материалы. Сер. 55.31. Инструментальное производство. Мн., 1990.

4. Курдюмов А. В., Олейник Г. С. // Кристаллография. № 41984. С. 792.

5. Курдюмов А. В., Островская Н. Ф. // Докл. АН СССР. № 1. 1982. С. 66.

6. Курдюмов А. В., // Кристаллография. 1975. Т. 20. № 5. С. 969.

7. Курдюмов А. В., Пилянкевич А. Н. и др. // Докл. АН СССР. 1976. Т. 229. № 2. С. 338.

8. Говор Г. А., Добрянский В. М., Леусенко А. А., Чобот Г. М. // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1. 1995. № 1. С. 28.

Поступила в редакцию 03.10.94.

УДК 621. 315

А. К. ФЕДОТОВ, М. И. ТАРАСИК, А. М. ЯНЧЕНКО

ПЕРКОЛЯЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ТРАНСПОРТА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫХ ПОЛИКРЕМНИЕВЫХ ПЛЕНКАХ ПОСЛЕ ОТЖИГА СКАНИРУЮЩИМ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧЕМ

Recombinational properties and peculiarities of carrier transport in heavily doped poly-Si layers after annealing by scanning laser beam were studied. The effective potential barriers of grain boundaries and the main carrier transport mechanisms have been determined. A qualitative model of carrier transport in the wide temperature range (4—300 K) is formulated.

Поликристаллические пленки в последнее время явились предметом интенсивных исследований вследствие их перспективности для производства полупроводниковых приборов [1]. Однако возможность их широкомасштабного применения ограничивается наличием в них электрически активных дефектов и, главным образом, границ зерен (ГЗ), которые вызывают деградацию некоторых параметров материала.

Электрическая активность ГЗ в поликристаллических полупроводниках определяется не только кристаллографической структурой, но и химическим составом границ. Об этом свидетельствуют, в частности, результаты по исследованию свойств обогащенных примесями безбарьерных ГЗ общего типа в германии. Поскольку в среднелегированном ($N_G \sim 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$) поликремнии безбарьерных ГЗ общего типа не существует в принципе, то для изучения относительной роли сегрегации примесей в электрофизике таких границ были проведены эксперименты на сильнолегированных поликремниевых пленках. Разброс высот и положения барьеров на таких границах приводит к наличию случайного потенциального рельефа из-за изгиба зон вблизи ГЗ. Поэтому такая система, отмечалось в [2], может рассматриваться как сильнолегированный и сильнокомпенсированный полупроводник, где роль компенсирующих примесей играют пограничные состояния [3].

1. Изготовление образцов. В качестве исходного материала служили поликремниевые пленки толщиной 400 нм, полученные методом химического осаждения из паровой фазы в реакторе пониженного давления при 620 °С (см. [4]). Пленки наносились на кремниевые подложки с ориентацией (100), покрытые изолирующим слоем термического окисла SiO_2 толщиной 0,45 мкм, и имели средний размер зерен 20—50 нм. Данные эффекта Холла свидетельствуют о высокой ($(N_a - N_d) \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) концентрации акцепторов в объеме зерен указанных пленок. С целью создания электрически активных ГЗ общего типа в таких пленках