

05;09  
©1994

## МЕТОД СОЗДАНИЯ КРЕМНИЯ С ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКИМИ ПОТЕРЯМИ В ДИАПАЗОНЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

*Б.М.Гарин, А.Н.Копнин, М.П.Пархоменко,  
А.А.Изынцев, В.А.Сабликов*

Вопрос о минимальных диэлектрических потерях в материалах в диапазоне миллиметровых (ММ) и субмиллиметровых (СММ) электромагнитных волн является крайне актуальным и открытым. В малопоглощающих диэлектриках существенную роль могут играть как решеточные потери, так и потери, обусловленные носителями заряда.

При фиксированной температуре теоретический предел уменьшения решеточных потерь в твердом диэлектрике в рассматриваемом диапазоне определяется многофононным механизмом потерь, в первую очередь двухфононными потерями в соответствующем идеальном кристалле [1,2]. Такие потери можно назвать собственными решеточными потерями (СРП). В [2,3] было предсказано, что в кристаллах со структурой алмаза можно ожидать относительно малые СРП по сравнению с другими кристаллами. Поэтому в достаточно высокоомных образцах таких кристаллов, в первую очередь в алмазе и кремнии, в принципе возможно достижение экстремально низких потерь. Имеющиеся экспериментальные данные для кремния подтверждают это. В высокоомных образцах кремния наблюдаются наименьшие (к настоящему времени) потери для конденсированных сред в коротковолновой части ММ диапазона при комнатной температуре (тангенс угла потерь  $\text{tg } \delta < 10^{-4}$ ) [4-7]. Из наблюдаемых температурно-частотных зависимостей потерь и их зависимости от удельного сопротивления образцов следует, что эти потери обусловлены свободными носителями заряда. Таким образом, решеточные потери в кремнии еще ниже и остаются к настоящему времени невыявленными (это относится к другим кристаллам со структурой алмаза).

В наиболее чистом образце кремния, в котором наблюдаются рекордно низкие потери при комнатной температуре ( $\text{tg } \delta \simeq 2.5 \cdot 10^{-5}$  на частоте  $f \simeq 150$  ГГц), удельное сопротивление  $\rho \simeq 40$  кОм·см. Последнее почти на порядок меньше, чем в собственном кремнии, где  $\rho = 250$  кОм·см при температуре  $T = 290$  К. Этому сопротивлению, согласно

расчету, отвечают потери на свободных носителях заряда  $\text{tg}\delta \approx 4 \cdot 10^{-6}$  при той же частоте [6]. Кроме того, согласно оценке для кристаллов со структурой алмаза, величина СРП в них при тех же условиях соответствует  $\text{tg}\delta \leq 2 \cdot 10^{-6}$  [9]. Отсюда следует принципиальная возможность дальнейшего существенного снижения потерь в кремнии.

Снижение потерь путем очистки кремния от примесей является весьма трудоемким и дорогостоящим. При этом не обеспечивается уменьшение потерь при понижении температуры до температуры жидкого азота, так как в упомянутых выше образцах кремния [4-8] свободные носители заряда обусловлены примесями с мелкими уровнями в запрещенной зоне, и концентрация их не изменяется. В результате наблюдается заметное (до трех раз) увеличение потерь при понижении температуры [8] из-за возрастания подвижности носителей заряда.

Нами предложен другой путь уменьшения потерь — компенсация примесями с глубокими уровнями в запрещенной зоне. Одним из наиболее удобных вариантов является легирование кремния золотом, что и реализовано в настоящей работе.

Из расчетов зависимости удельного сопротивления кремния от концентрации примесей золота  $N_{\text{Au}}$  при комнатной температуре [10] следует, что при введении в кремний *n*-типа достаточно больших концентраций золота возможно достижение величин  $\rho \sim 300$  кОм·см, что близко к собственному кремнию. При этом в достаточно широкой области значений концентрации золота ( $5 < N_{\text{Au}}/N_{\text{D}} < 500$ , где  $N_{\text{D}}$  — концентрация доноров)  $\rho$  сравнительно слабо зависит от  $N_{\text{Au}}$  и весьма велико:  $\rho \geq 100$  кОм·см. Это отвечает достаточно низким потерям на свободных носителях заряда:  $\text{tg}\delta < 10^{-5}$  при  $f > 100$  ГГц. При снижении температуры удельное сопротивление должно увеличиваться благодаря сильному уменьшению концентрации свободных носителей заряда из-за больших энергий активации глубоких уровней золота по сравнению с тепловой энергией.

Исходные образцы кремния в форме дисков с плоскопараллельными гранями были вырезаны из массивных кристаллов кремния *n*-типа (с примесью фосфора) с различными  $\rho$ , предоставленных В.А. Максимовым (ГИРЕДМЕТ, Москва). Измерения потерь проводились в интерферометре Фабри-Перо на частоте 213 ГГц (длина волны 1.41 мм).

После измерения потерь в исходных образцах проводился процесс легирования золотом. Оно наносилось на предварительно подготовленную плоскую поверхность образцов методом вакуумного напыления. Затем проводился процесс высокотемпературной диффузии золота. Концентрация вво-

Удельное сопротивление  $\rho$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  в кремнии на частоте  $f = 213$  ГГц при  $T = 290$  К.

Измеряемая величина	Образец		
	1	2	3
$\rho$ до внедрения Au, кОм·см	1	1	0.1
$\rho$ после внедрения Au, кОм·см	140–200	45–110	90–250
$\operatorname{tg}\delta$ до внедрения Au	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$
$\operatorname{tg}\delta$ после внедрения Au	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$
Время диффузии, ч	9	18	12
Диаметр образца, мм	42	42	77
Конечная толщина образца, мм	5.03	5.38	4.60

димого золота определялась предельной растворимостью его в твердом кремнии [10] при температуре диффузии. Минимальное время диффузии при заданной температуре определялось необходимостью внедрения атомов золота на глубину нескольких миллиметров.

По окончании процесса диффузии с плоских поверхностей образцов механически снимался слой толщиной 0.5 мм. Затем проводилась их шлифовка для обеспечения плоскопараллельности с точностью 2 мкм, что требовалось для измерения потерь в интерферометре Фабри–Перо. Удельное сопротивление на плоских поверхностях образцов при температуре 290 К измерялось четырехзондовым методом. После легирования золотом проводимость стала  $p$ -типа. Результаты измерений  $\rho$  и  $\operatorname{tg}\delta$  приведены в таблице.

Из таблицы видно, что легирование кремния золотом позволяет во много раз уменьшить в нем диэлектрические потери до уровня, по крайней мере сравнимого с погрешностью данных измерений ( $3 \cdot 10^{-5}$ ) и близкого к известным из [7] рекордным значениям диэлектрических потерь при комнатной температуре. В связи с тем, что потери на свободных носителях заряда уменьшаются с повышением частоты ( $\operatorname{tg}\delta \sim f^{-1}$ ), в СММ диапазоне они должны быть еще меньше.

Были проведены также предварительные измерения диэлектрических потерь в образцах кремния, легированного золотом, при  $T = 78 - 290$  К, которые качественно показывают уменьшение потерь при понижении температуры. Наблюдалось также значительное увеличение удельного сопротивления при небольшом понижении температуры. Это подтверждает принципиальное отличие данных образцов кремния от исследованных ранее в [4–8] образцов с мелкими примесями. Полученные теоретические и экспериментальные результаты показывают не только возможность дости-

жения минимальных потерь в образцах кремния с золотом при комнатной температуре, но и возможность существенного уменьшения потерь при снижении температуры.

Программа дальнейших исследований включает оптимизацию легирования кремния золотом для достижения минимальных потерь, изучение их температурной зависимости и природы, а также совершенствование методики измерения потерь.

Авторы благодарят Н.А. Кунькову, В.Е. Сизова, Л.Б. Хусид за помощь в проведении работы, а также В.В. Мериакри, В.А. Флягина, А.Ш. Фикса и В.В. Паршина за внимание к работе и поддержку.

### Список литературы

- [1] Гарин Б.М., Галдецкий А.В. // Оптика и спектроскопия. 1981. Т. 50. В. 5. С. 987.
- [2] Галдецкий А.В., Гарин Б.М. Препринт ИРЭ АН СССР. № 17 (320). М., 1981. 31 с.
- [3] Галдецкий А.В., Гарин Б.М. // Тез. докл. Всесоюз. конф. "Проектирование и применение радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах". Саратов, 1983. С. 98-99.
- [4] Afsar M.N., Chi H., Li X. // Digest of Conf. on Precision Electromagnetic Measurements. Ottawa, 1990. P. 238.
- [5] Heidinger R., Kumlin A. // Digest of 14th Int. Conf. on IR and MM Waves. Florida, 1990. P. 274-278.
- [6] Гарин Б.М., Копнин А.Н., Мериакри В.В. и др. // Тез. докл. I Укр. симп. "Физика и техника ММ и СУБММ радиоволн". Т. 1. Харьков, 1991. С. 86-87.
- [7] Паршин В.В. Препринт ИПФ РАН № 342. Н. Новгород, 1993. 14 с.
- [8] Heidinger R., Kumlin A. // 16 th Int. Conf. IR and MM Waves. SPIE Vol. 1576. Lauzanne, 1991. P. 450-451.
- [9] Гарин Б.М. // Тез. докл. Росс. науч.-техн. конф. "Диэлектрики-93". Т. 1. СПб, 1993. С. 98-99.
- [10] Милнс А. // Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М., 1977; Буллис В.М. и др. Там же. С. 32-34.

Институт радиотехники  
и электроники  
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию  
16 августа 1994 г.