

# Корреляционные свойства электронных характеристик сверхпроводников с их сверхпроводящими параметрами

Д.Р. Джураев  
Бухарский государственный университет,  
Бухара, Узбекистан  
djurayev2002@mail.ru

Ж.С. Абдуллоев  
Бухарский государственный университет,  
Бухара, Узбекистан

А.А. Тураев  
Бухарский государственный университет,  
Бухара, Узбекистан

**Аннотация** — Настоящая работа посвящена исследованию сверхпроводящих и электронных характеристик соединений с решетками типов A15, B1 и перовскитов. В работе исследуются такие характеристики сверхпроводников как критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние  $T_k$ , сверхпроводящая энергетическая щель  $\Delta$ , концентрация носителей (электронов проводимости)  $N$  и глубина проникновения магнитного поля (лондоновская глубина)  $\lambda_L$ . Результаты исследования показали, что существует корреляция между параметрами  $T_k$ ,  $\Delta$ ,  $N$ , подчиняющаяся степенному закону:  $T_k \approx N^{-2/3}$ ;  $\Delta \approx N^{-2/3}$ .

**Ключевые слова** — сверхпроводимость, критическая температура, энергетическая щель, концентрация носителей, лондоновская глубина, корреляция, туннельные свойства

## I. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что явление сверхпроводимости и устройства, использующие этот эффект, имеют практическое значение и перспективы для развития информационных технологий. Исследование явления сверхпроводимости лежит в области нанотехнологий. Проведение фундаментальных и прикладных исследований сверхпроводников, особенно их сверхпроводящих, оптических, туннельных свойств и микрохарактеристик является одной из актуальных проблем современной физики.

Одной из важных задач в области сверхпроводимости является поиск материалов с высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние  $T_k$ . К сожалению, в рамках строгой теории невозможно предсказать, какие именно материалы будут иметь высокие значения критической температуры. Чтобы иметь возможность предсказывать свойства материала, важно установить зависимость  $T_k$  от физических характеристик сверхпроводников.

Исходя из теоретических представлений, целесообразным представляется сопоставление  $T_k$  с электронными характеристиками сверхпроводников. В связи с этим представляет интерес изучение оптических свойств сверхпроводников с целью получения электронных характеристик и корреляции их со сверхпроводящими параметрами.

В настоящей работе были изучены свойства пленок нитрида ниобия, оптические свойства которого исследовались поляриметрическими методами [1, 2], а сверхпроводящие свойства – резистивными и туннельными методами [3, 4].

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сверхпроводящее соединение нитрида ниобия имеет кубическую решетку типа B1 (типа NaCl). Атомы ниобия Nb и атомы азота N по отдельности образуют

кубические гранцентрированные решетки, таким образом решетка B1 образована двумя вставленными друг в друга кубическими гранцентрированными решетками. Элементарная ячейка решетки B1 содержит восемь атомов: по четыре атома Nb и N или четыре молекулы NbN.

В работе были проведены туннельные исследования сверхпроводящей энергетической щели пленок NbN при температурах 1,8 и 4,2 К. Исследования температурной зависимости энергетической щели  $\Delta$  пленок NbN показало, что она совпадает с теоретической кривой, полученной в теории БКШ (теория Бардина-Купера-Шриффера – микроскопическая теория сверхпроводимости).

Экспериментальные значения  $\Delta$ ,  $T_k$  и  $N$  для пленок NbN, а также данные, полученные в результате оптических, туннельных и рентгеноструктурных исследований, приведены в таблице 1. Значения постоянной кристаллической решетки и лондоновская глубина проникновения магнитного поля пленок NbN также отражены в таблице 1.

Таблица I. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ СОЕДИНЕНИЯ ПЛЕНОК НИТРИДА НИОБИЯ

Параметры	Образцы				Стехиометрической состав
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	
$T_k$ , К	15,6	15,6	14	16	17,1
$\Delta T_k$ , К	0,5	0,5	1,8	0,3	0,2
$a_0$ , Å	4,394	4,395	4,362	4,389	4,392
ат. % Nb	51,0±0,2	50,4±0,2	58,2±0,7	49,5±0,2	50,0
Текстура	111	111	200	200	–
$\Delta$ , мэВ	2,75	2,75	2,31	2,65	3,05
$N$ , см <sup>-3</sup>	8,9·10 <sup>20</sup>	7,7·10 <sup>20</sup>	1,3·10 <sup>21</sup>	2,3·10 <sup>20</sup>	4,4·10 <sup>20</sup>
$\lambda_L$ , Å	1800	1900	1500	3800	2500

В результате проведенных исследований получено, что для стехиометрического соединения NbN величина  $N_m$  составляет  $N_m = 4,4 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Сопоставляя данные  $N_m$  для NbN и вышеприведенных систем, можно обнаружить, что эта величина больше чем у полупроводниковых систем, но меньше чем у металлических систем.

Таким образом, исследования сверхпроводящих параметров пленок NbN показывают, что для данной системы одним из возможных путей повышения  $T_k$  служит уменьшение величины  $N$  – концентрации электронов проводимости. При этом нужно учитывать, что в подобной системе существует граничная концентрация электронов проводимости, при которой наступает перестройка электронной системы, связанная, по-видимому, с изменением структуры и падением  $T_k$ . Скорость уменьшения значения  $T_k$  в обе стороны от максимума одинаковая.

Представляет интерес исследование корреляции между  $T_k$ ,  $\Delta$  и  $N$  пространственно-неоднородных пленок ниобия галлия (Nb-Ga) со структурой A15. В элементарной ячейке кристаллической решетки A15 (химическая формула  $A_3B$ ) атомы В (в нашем случае Ga) образуют объемцентрированную кубическую решетку, на гранях которой находятся по два атома А (Nb). Атомы А образуют три ортогональных системы линейных цепочек. Элементарная ячейка решетки A15 содержит восемь атомов, из них шесть атомов А и два атома В, т.е. она содержит две молекулы  $A_3B$ .

Пленки указанного соединения получены методом одновременного испарения различных компонент соединения в вакууме из разных испарителей. Тугоплавкий ниобий испарялся электронным пучком. Легкоплавкий галлий (Ga) испарялся термически из ниобиевой лодочки. Специальная технология позволила получить пленочные образцы Nb-Ga, обладающие пространственной неоднородностью. Сверхпроводящие и электронные характеристики образцов приведены в таблице 2. Исследования пространственной неоднородности полученных образцов проводились резистивным и туннельными методами [6].

Таблица II. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЕДИНЕНИЙ СО СТРУКТУРОЙ A15 И ПЕРОВСИТА

№	Соединение	$T_k$ , К	$\Delta$ , мэВ	$N$ , см <sup>-3</sup>	$\Lambda_L$ , Å	Литература
1	Y-Ba-Cu-O	50±94	10±40	1 ÷ 6·10 <sup>21</sup>	700±1700	[7,8]
2	Nb <sub>3</sub> Ge	23,2	4,1	0,65·10 <sup>22</sup>	670	[9,10]
3	Nb <sub>3</sub> Ga	20,3	3,6	0,9·10 <sup>22</sup>	570	Наст. работа
4	Nb <sub>3</sub> Sn	18	3,5	1,04·10 <sup>22</sup>	530	[4,9]
5	Nb <sub>3</sub> Si	18	3,5	1,2·10 <sup>22</sup>	490	[9,10]
6	Nb <sub>3</sub> Al	16	2,6	1,4·10 <sup>22</sup>	450	[11]
7	V <sub>3</sub> Si	16,2	2,65	1,7·10 <sup>22</sup>	410	[10]
8	Nb <sub>3</sub> (Al Si)	15,5	-	1,7·10 <sup>22</sup>	410	[10]
9	V <sub>3</sub> Ga	13,5	2,05	2,24·10 <sup>22</sup>	360	[10]
10	Nb-Ti	9,75	1,5	4,49·10 <sup>22</sup>	250	[10]
11	Nb-Ga	16,5	2,79	1,5·10 <sup>22</sup>	440	Наст. работа
12	Nb-Ga	16,2	2,75	1,75·10 <sup>22</sup>	400	"-
13	Nb-Ga	14,5	2,19	2,1·10 <sup>22</sup>	370	"-
14	Nb-Ga	11,8	1,79	3,0·10 <sup>22</sup>	310	"-
15	Nb-Ga	11,3	1,47	3,3·10 <sup>22</sup>	300	"-
16	Nb-Ga	9,5	1,47	4,0·10 <sup>22</sup>	270	"-
17	Nb-Ga	8,3	0,99	4,6·10 <sup>22</sup>	250	"-

Для определения концентрации электронов проводимости Nb<sub>3</sub>Ga были использованы данные Nb<sub>3</sub>Ge, так как их химические и структурные свойства очень близки. Сопоставление постоянных кристаллической решетки  $a_0$  сверхпроводников Nb<sub>3</sub>Ga и Nb<sub>3</sub>Ge показало, что разница значений  $a_0$  составляет 0,01 Å. В результате анализа работ [13,14] для соединения Nb<sub>3</sub>Ge с  $T_k=23,4$  К получены  $\Delta=4,14$  мэВ и  $N = 0,65 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Для сравнения в таблице 2 также приведены данные для других соединений со структурой A15 и металлооксида Y-Ba-Cu-O [7-9].

В ходе работы были построены зависимости  $T_k(N)$  и  $\Delta(N)$  для сверхпроводящих соединений на основе ниобия и ванадия со структурой A15. Данные зависимости для металлоксидного сверхпроводника Y-Ba-Cu-O продемонстрировали, что результаты настоящей работы для сверхпроводящего соединения Nb-Ga хорошо согласуются с данными, полученными для других сверхпроводников. Эти зависимости с хорошей точностью описываются приближенными формулами:

$$T_k \approx 22N^{-2/3}, \quad \Delta \approx 3,4N^{-2/3}$$

Разброс экспериментальных данных, полученных при определении энергетической щели в ВТСП Y-Ba-Cu-O (от 10 до 40 мэВ) методами туннельной, оптической, теплопроводной и микроконтактной спектроскопии, объясняется сложной природой рассматриваемых соединений и возникающими при этом возможными эффектами: времени жизни электрона, одноэлектронного туннелирования, близости в нормальных и сверхпроводящих границах, анизотропии щели, токов утечки; структурных дефектов, которые могут создать цепочку слабых связей, разрушение слабых связей в неоднородной структуре ВТСП, захват магнитного потока на неоднородностях.

Отсюда следует, что туннельная и микроконтактная спектроскопия природы ВТСП материалов представляет собой сложную задачу. При туннельной спектроскопии должно выполняться условие, толщина образца должна быть много меньше длины свободного пробега электрона  $d < l_e$ . Для ВТСП  $l_e$  и  $\xi_0 \sim 10 \div 30$  Å. Это условие трудно выполнимо, потому что  $l_e$  и  $\xi_0$  намного меньше значения толщины образца  $d$ .

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении отметим, что полученные результаты показывают, что для получения сверхпроводников с высокими критическими температурами  $T_k$  нужно стремиться к уменьшению концентрации  $N$ , приближаясь к границе металл-полупроводник. При этом необходимо учитывать, что существует граница, где происходит перестройка электронных структур, что наблюдается в металлооксидных высокотемпературных сверхпроводниках.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мотулевич, Г.П. Оптические свойства непереходных металлов / Г.П. Мотулевич // Труды ФИАН. – 1971. – Т. 55. – С. 3-150.
- [2] Джураев, Д.Р., Кузьмичев Н.Д., Мотулевич Г.П. Определение электронных характеристик нитрида ниобия оптическим методом / Д.Р. Джураев, Н.Д. Кузьмичев, Г.П. Мотулевич // Труды ФИАН. – 1988. – Т. 190. – С. 108-127.
- [3] Антонова, Е.А. Энергетическая сверхпроводящая щель нитрида ниобия / Е.А. Антонова, Д.Р. Джураев, Г.П. Мотулевич, В.А. Сухов // ЖЭТФ. – 1981. – Т.8. – С. 2426-2429.
- [4] Джураев, Д.Р. Температурная зависимость сверхпроводящей энергетической щели пленок нитрида ниобия / Д.Р. Джураев // Краткие сообщения по физике. – 1984. – Т. 3. – С. 58-62.
- [5] Головашкин, А.И. Связь критической температуры с физическими характеристиками сверхпроводников / А.И. Головашкин, Т.И. Кузнецова // Труды ФИАН. – 1984. – Т. 151. – С.3-62.
- [6] Джураев, Д.Р. Туннельные исследования пространственно неоднородных пленок ниобия-галлия со структурой A15 / Д.Р.Джураев, И.С. Левченко, Г.П. Мотулевич // Труды ФИАН. – 1988. – Т. 190. – С. 174-180.
- [7] Абель, Е.В. Исследование энергетической щели в сверхпроводниках состава Y-Ba-Cu-O методом ИК отражения / Е.В.Абель, В.С. Багаев, Д.Н. Басов, Ю.Ф. Ельцев и др. // Письма в ЖЭТФ. – 1988. – Т.47, №3. – С.144-146.
- [8] Аминов, Б.А. Туннельная спектроскопия высокотемпературного сверхпроводящего соединения YBa2Cu3O7-δ / Б.А. Аминов, Н.Б. Брандт, Р. Миоллер и др. //Препр. МГУ. – 1988. – Т.12. – С.5.
- [9] Головашкин, А.И. Корреляция критической температуры сверхпроводников с их электронными и фононными характеристиками / А.И. Головашкин, И.С. Левченко, Г.П. Мотулевич // ФТТ. – 1978. – Т.20, №10. – С. 3061-3064.
- [10] Головашкин А.И., Печень Е.В. Сверхпроводящие соединения Nb3Ge и Nb3Si // Труды ФИАН. – Т. 151. – С. 63-136.  
Кузьмичев, Н.Д. Дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости и электронные характеристики соединений Nb-Al и Nb-Ge со структурой A15 / Н.Д. Кузьмичев, И.С. Левченко, Г.П. Мотулевич // Труды ФИАН. – 1988. – Т. 190. – С. 72-108.