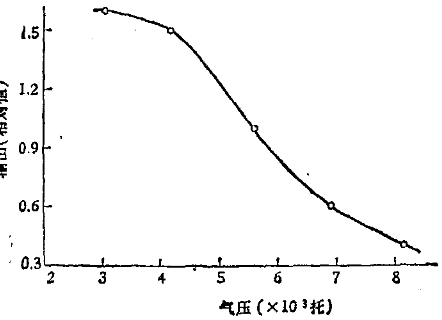

图1 NII 648.2毫微米激光输出与工作气压的关系

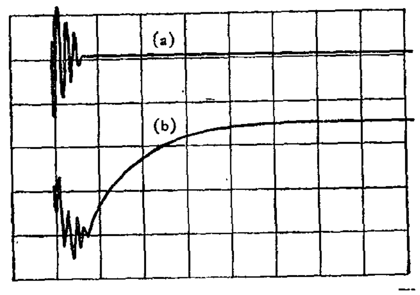

图2 放电脉冲及 NII 648.2 毫微米激光输出脉冲波形图

(a) 为电流脉冲波形. 纵坐标为放电电流相对值(示波器标度5伏/格),横坐标为20微秒/格;

(b) 为 NII 648.2 毫微米激光输出波形. 纵坐标为激光输出相对值(示波器标度0.5伏/格),横坐标为20微秒/格

图1为以纯氮为工作物质时，激光新谱线NII 648.2 毫微米激光的输出强度与工作气压的关系. 纯氮气的工作气压在10^{-3}乇量级. 随工作气压下降，输出增强，在3×10^{-3}乇附近趋于饱和. 拍摄了放电电流脉冲及 NII 648.2 毫微米激光新谱线的输出脉冲波形，如图2所示. 激光新谱线的脉宽约30微秒，与NII 567.9毫微米已知激光谱线脉宽是一致的，比电流脉宽7微秒大得多. 激光输出在放电起始约10微秒后达到峰值，因此，它们都是在放电余辉中产生的激光，即复合激光.

等离子体复合激光作用可用下式表示为

$$N^{(n+1)+}+e+M\longrightarrow N^{n+*}+M$$

对本文得到的5条新氮离子激光谱线，$n=1$. 因此，放电电流数值的合适控制，对能否得到本文的结果是极为重要的. 实验证明，本文采用的脉冲放电回路中，串入一定数值的电感来改变放电脉宽及峰值电流的技术是有效的. 它也可用于对其它新激光工作物质和激光谱线的探索.

参 考 文 献

[1] R. A. McFarlane, *Appl. Phys. Lett.*, **5** (1964), 91.

[2] H. G. Heard and J. Peterson, *Proc. IEEE*, **52** (1964), 1050.

[3] P. K. Cheo and H. G. Coper, *J. Appl. Phys.*, **36** (1965), 1862.

[4] M. S. Chiu and C. C. Chou, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17**, (1981), 1592.

[5] C. E. Moore Atomic Energy Levels, Nat. Bur. Stand. (U. S.), Vol. I (1971), 35—40.

[6] K. E. Moore A Multiplet Table of Astrophysical Interest, Nat. Bur. Stand. (U. S.), (1959), 8—9.

[7] W. R. Bennett et al., *Appl. Phys. Lett.*, **4** (1964), 180.

碱金属s-电子的热质量

金光星　姜文植

(延边大学物理系)

一、引　言

金属中电子-电子相互作用与电子-声子相互作用所引起的多体效应的理论工作已有进展. D. F. Dubols[1] 曾详细讨论凝聚电子气体的相互作用效应，但只有 r_s¹⁾ <2 的情况才合理收敛. T. M. Rice[2] 等曾讨论中间密度($1<r_s<4$)电子气体的相关问题及有效质

1) r_s是电子平均所占球半径，以$\frac{\hbar^2}{me^2}$为单位.

量，但对金属密度情况来讲，也不能令人满意. J. G. Fletcher[3] 等曾讨论金属电子密度情况的一些性质. 志水正男[4]等根据 Fletcher 的讨论结果，讨论了碱金属 s-电子的晶格有效质量，结果较好.

本文在 Fletcher 讨论的基础上，进一步用格林函数的微扰论考虑了电子-声子相互作用，并计算了 s-电子的热质量.

二、一个有效电子的能量

当我们不考虑电子-声子相互作用时，在金属晶格中相互作用电子气体的单电子能量可写成[4]

$$\varepsilon(\boldsymbol{K}) = \varepsilon_{\mathrm{L}} + \varepsilon_{\mathrm{ex}} + \varepsilon^{s.r}_{\mathrm{corr,a}} + \varepsilon^{s.r}_{\mathrm{corr,p}} + [\text{长程项}],$$

式中 ε_{L} 表示包括晶格对电子影响的动能；$\varepsilon_{\mathrm{ex}}$ 表示被屏蔽的短程交换相互作用能；$\varepsilon^{s.r}_{\mathrm{corr,a}}$ 表示自旋反平行电子之间的短程相关能；$\varepsilon^{s.r}_{\mathrm{corr,p}}$ 表示自旋平行电子之间的短程相关能. 因为电子-电子相互作用的长程部分表现为 Plasma 运动，而它常温下才可激化，所以在我们所考虑的低温下不必考虑. 另外，在短程部分，因为我们讨论金属密度情况，$r_s > 2$，所以 $\varepsilon^{s.r}_{\mathrm{corr,a}} \gg \varepsilon^{s.r}_{\mathrm{corr,p}}$，于是单电子能量可写为

$$\varepsilon(\boldsymbol{K}) = \varepsilon_{\mathrm{L}} + \varepsilon_{\mathrm{ex}} + \varepsilon^{s.r}_{\mathrm{corr,a}}, \tag{1}$$

式中 ε_{L}[6] 为

$$\varepsilon_{\mathrm{L}} = \varepsilon_s(K_{\mathrm{F}}) + (K - K_{\mathrm{F}})\left(\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial K}\right)_{K_{\mathrm{F}}} = \frac{\hbar^2 K^2}{2m_{\mathrm{L}}}, \tag{2}$$

其中 s 表示球形近似，m_{L} 表示“晶格有效质量”，即电子在金属晶格势场中的有效质量.

$$\varepsilon_{\mathrm{ex}} = -\frac{e^2 K_{\mathrm{F}}}{2\pi}\left[1 + \frac{K_{\mathrm{F}}^2 - K^2}{KK_{\mathrm{F}}}\ln\left(\frac{K + K_{\mathrm{F}}}{\beta_c}\right) + \frac{3K^2 - K_{\mathrm{F}}^2}{2KK_{\mathrm{F}}} - 2\beta_c + \frac{\beta_c^2 K_{\mathrm{F}}}{2K}\right], \tag{3}$$

其中 K_{F} 表示 Fermi 波矢，$\beta_c = K_c/K_{\mathrm{F}}$，$K_c$ 为电子的最大集团振荡波矢[1)].

$$\varepsilon^{s.r}_{\mathrm{corr,a}} = -\frac{1}{2\pi^4}\int_{p>\beta_c}\frac{d^3p}{p^4}\int d^3q \cdot \frac{f_q(1-f_{q-p})(1-f_{K+p})}{\frac{\boldsymbol{p}}{K_{\mathrm{F}}}\cdot\left(\frac{\boldsymbol{K}}{K_{\mathrm{F}}} - \frac{\boldsymbol{q}}{K_{\mathrm{F}}} - \frac{\boldsymbol{p}}{K_{\mathrm{F}}}\right)} + \frac{1}{2\pi^4}\int_{p>\beta_c}\frac{d^3p}{p^4} \cdot \int d^3q\,\frac{f_q f_{K-p}(1-f_{q-p})}{\frac{\boldsymbol{p}}{K_{\mathrm{F}}}\cdot\left(\frac{\boldsymbol{K}}{K} - \frac{\boldsymbol{q}}{K_{\mathrm{F}}}\right)}, \tag{4}$$

式中 $f_K = 1$，$K \leqslant 1$；$f_K = 0$，$K \geqslant 1$；波矢以 K_{F} 为单位，能量以 Rydberg 为单位.

下面引进量子化的晶格振动，考虑电子-声子相互作用，求出波矢为 $\boldsymbol{K}$ 的一个有效电子的能量. 因为我们讨论 Fermi 面上的电子，所以可用准粒子的概念，这个准粒子是质量为 $m_{\mathrm{L,e}}$ 的，遵循 Fermi-Dirac 统计的自由粒子. 此准粒子与声子相互作用所引起的碱金属 s-电子的能量变化可用电子-声子相互作用自能 $\sum_{\mathrm{e-p}}$ 来表示. 这个自由粒子的 Hamilton 为 $H = H_0 + H_{\mathrm{e-p}}$，其中 $H_{\mathrm{e-p}}$ 表示电子-声子相互作用的微扰项，而用场论方法[5]可把它表示成

$$H_{\mathrm{e-p}} = \frac{1}{\sqrt{V}}\sum_{\boldsymbol{K}}\sum_{\boldsymbol{p}}\sum_{\sigma}\left(\frac{i2\varepsilon_{\mathrm{F}}}{3}\right)\left(\frac{\hbar q}{2m_{\mathrm{I}}n_{\mathrm{I}}v_{\mathrm{l}}}\right)^{1/2} \cdot a^+_{\boldsymbol{K}+\boldsymbol{q},\sigma}[b^+_{\boldsymbol{q}} + b_{-\boldsymbol{q}}], \tag{5}$$

式中 m_{I} 表示离子的质量；n_{I} 表示离子数密度；v_{l} 表示纵声子速度；$a^+_{\boldsymbol{K}}$，$a_{\boldsymbol{K}}$ 分别表示电子的产生算符与消灭算符；类似的 b 表示声子的算符. 我们根据 Green 函数的微扰论，经过计算可得二级近似的自能[5]，其结果

$$\sum\nolimits_{\mathrm{e-p}} = \sum\nolimits_{\boldsymbol{K}}(i\omega_{l_1}) = \frac{1}{\beta V}\sum_{\boldsymbol{p}}\sum_{\boldsymbol{q}}\sum_{l_2}\frac{\left|\frac{i2\varepsilon_{\mathrm{F}}}{3}\left(\frac{\hbar q}{2m_{\mathrm{I}}n_{\mathrm{I}}v_{\mathrm{l}}}\right)^{1/2}\right|^2}{i\omega_{l_2} - \varepsilon_{\boldsymbol{p}}} \times \left[\frac{1}{\omega_{\boldsymbol{q}} + i(\omega_{l_1} - \omega_{l_2})} + \frac{1}{\omega_{\boldsymbol{q}} - i(\omega_{l_1} - \omega_{l_2})}\right], \tag{6}$$

式中 $1/(i\omega_{l_2} - \varepsilon_{\boldsymbol{p}})$ 表示准粒子线，而其余因子表示声子线. 下面用积分代替 (6) 式中对 l_2 的求和，再经过计算留数而得

$$\sum\nolimits_{\boldsymbol{K}}(i\omega_{l_1}) = \frac{1}{V}\sum_{\boldsymbol{p}}\sum_{\boldsymbol{q}}\left|\frac{i2\varepsilon_{\mathrm{F}}}{3}\left(\frac{\hbar q}{2m_{\mathrm{I}}n_{\mathrm{I}}v_{\mathrm{l}}}\right)^{1/2}\right|^2$$

1) K_c——the maximum collective oscillation wave vector.

$$\times\left[\frac{f_p+N_q}{i\omega_{l_1}-\varepsilon_p+\omega_q}+\frac{1-f_p+N_q}{i\omega_{l_1}-\varepsilon_p-\omega_q}\right]\delta(\boldsymbol{K},\boldsymbol{p}+\boldsymbol{q}),\quad(7)$$

式中 $f_p = f_{K-q}$ 是准粒子的分布函数；N_q 为声子的分布函数，即 $N_q = \langle b_q^+ b_q\rangle$；$\varepsilon_p = \epsilon_{K-q} - \epsilon_F$，其中

$$\epsilon_{K-q} = \frac{\hbar^2(\boldsymbol{K}-\boldsymbol{q})^2}{2m_{L,e}}.$$

在低温下可令 $N_q \approx 0$．如取 $i\omega_1 \to X$（实数），通过解析延拓得到

$$\sum_{K}(X) = \frac{1}{V}\sum_q\left|\frac{i2\epsilon_F}{3}\left(\frac{\hbar q}{2m_I n_I v_I}\right)^{1/2}\right|^2\times\left[\frac{f(\varepsilon_{K-q})}{X-\varepsilon_{K-q}+\omega_q}+\frac{1-f(\varepsilon_{K-q})}{X-\varepsilon_{K-q}-\omega_q}\right],\quad(8)$$

经过计算可得

$$\sum_{K}(X) = -\frac{\epsilon_F}{3m_I v_I}\left(\frac{n_e}{n_I}\right)\left(\frac{q_m}{2K_F}\right)^2\left(\frac{1}{v_I}-\frac{1}{v_F}\right)X,\quad(9)$$

其中 v_F 是电子的 Fermi 速度，q_m 是 Debye 截断波矢，n_e 是电子数浓度，令

$$\eta = \frac{\epsilon_F}{3m_I v_I}\left(\frac{n_e}{n_I}\right)\left(\frac{q_m}{2K_F}\right)^2\left(\frac{1}{v_I}-\frac{1}{v_F}\right),\quad(10)$$

它表示电子-声子相互作用参数．

单电子的能量可由单电子 Green 函数的极点的实部给出，所以由下面的方程确定

$$E_K - \epsilon_K - \sum_K = 0,\quad X = E_K - \epsilon_F.\quad(11)$$

由 (9)，(10)，(11) 式得，自能

$$\sum_{e-p} = -\frac{1}{1+\eta}\left[\epsilon_L + \epsilon_{ex} + \epsilon_{corr,a}^{s,r}\right] - \frac{1}{1+\eta}\epsilon_F,\quad(12)$$

于是碱金属中一个有效电子的能量可写为

$$E_K = \epsilon_L + \epsilon_{ex} + \epsilon_{corr,a}^{s,r} + \sum_{e-p}.\quad(13)$$

三、s-电子的热质量

我们根据 (13) 式可得 s-电子在 Fermi 面上的有效质量——热质量 m_t．为了求得热质量的表达式，对 (13) 式取 K 的导数，并取 $K=1$，就可得热质量 m_t 的倒数，即

$$\frac{1}{m_t} = \frac{1}{m_L} + \frac{1}{m_{ex}} + \frac{1}{m_{corr}} + \frac{1}{m_{e-p}},\quad(14)$$

式中 $\frac{1}{m_L}$ 取 Ham[6] 的计算结果，

$$\frac{1}{m_L} = 2(E_2 + 2E_4),\quad(15)$$

其中 E_2 与 E_4 是能量对 K 的展开系数．后三项分别等于

$$\frac{1}{m_{ex}} = \frac{1}{\pi}\left[\ln\frac{2}{\beta_c} + \frac{\beta_c^2}{4} - 1\right],\quad(16)$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{m_{corr}} = \frac{1}{\pi^2}\Big\{&\left[\frac{5}{3}\ln 2 - 2 - \frac{4}{3}\ln\beta_c - \frac{4}{3\beta_c^2} - \frac{4}{3\beta_c^2}\ln 2\right] + \left[\frac{\beta_c}{12} + \frac{2}{3} + \frac{3}{2\beta_c} + \frac{2}{3\beta_c^2} - \frac{2}{3\beta_c^3}\right]\ln(2+\beta_c)\\&+\left[-\frac{\beta_c}{12} + \frac{2}{3} - \frac{3}{2\beta_c} + \frac{2}{3\beta_c^2} + \frac{2}{3\beta_c^3}\right]\ln(2-\beta_c)\Big\},\end{aligned}\quad(17)$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{m_{e-p}} = -\frac{1}{1+\eta}\Big\{&2[E_2+2E_4] + \frac{1}{\pi}\left[\ln\frac{2}{\beta_c} + \frac{\beta_c^2}{4} - 1\right] + \frac{1}{\pi^2}\left[\frac{5}{3}\ln 2 - 2 - \frac{4}{3}\ln\beta_c - \frac{4}{3\beta_c^2} - \frac{4}{3\beta_c^2}\ln 2\right] + \frac{1}{\pi^2}\left[\frac{\beta_c}{12} + \frac{3}{3\beta_c} + \frac{2}{3} + \frac{2}{3\beta_c^2} - \frac{2}{3\beta_c^3}\right]\\&\cdot\ln(2+\beta_c) + \frac{1}{\pi^2}\left[-\frac{\beta_c}{12} + \frac{2}{3} - \frac{3}{2\beta_c} + \frac{2}{3\beta_c^2} + \frac{2}{3\beta_c^3}\right]\ln(2-\beta_c)\Big\},\end{aligned}\quad(18)$$

上式中 $\beta_c = \gamma r_s^{1/2}$，$r$ 的值如表 1 所示．

我们用以上的结果，可以讨论碱金属中诸相互作用对 s-电子热质量的影响．

四、计 算 结 果

我们用 (15)—(18) 式可计算 s-电子的热质量，也可以观察电子-声子相互作用等对热质量的贡献．在表示式中，电子-声子相互作用参

（下转第 634 页）